

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
Праця на правах рукопису

КОЗАК ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 664.6:621.56

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУ ДЛЯ
ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ
ПОТОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.С. Козак

Науковий керівник: Теличкун Володимир Іванович

Кандидат технічних наук, професор



АНОТАЦІЯ

Козак О.С. Розроблення та обґрунтування параметрів апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» - Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Дисертація присвячена розробці методологічного підходу до проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва. Основа методологічного підходу полягає у визначенні фізико-механічних показників продукту, на які впливає процес вакуумного охолодження, та розрахунку режимних параметрів цього процесу за допомогою розробленої математичної моделі, яка враховує вплив вакуумного охолодження на фізико-механічні показники продукту. У дослідженні виконано огляд існуючих способів та обладнання для охолодження хлібобулочних виробів в умовах сучасного хлібопекарського підприємства, а також проаналізовано процес вакуумного охолодження та його вплив на фізико-механічні показники продукту. Визначено фізико-механічні показники продукту, надмірний вплив на які може призвести до руйнування виробів, і є обмежуючими значеннями технічних параметрів апарату для вакуумного охолодження.

На основі аналізу способів та обладнання для охолодження хлібобулочних виробів було визначено що вакуумний спосіб охолодження є перспективним з огляду на енергоефективність та швидкість охолодження хлібобулочних виробів. Водночас існуюче обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів вимагає ручної праці, не забезпечує поточності виробництва, має великі вільні об'єми вакуумних камер, що в свою чергу збільшує тривалість охолодження, та зменшує енергетичну ефективність вакуумного способу охолодження хлібобулочних виробів. Це зумовлює необхідність створення апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

На основі проведених досліджень процесу вакуумного охолодження на прикладі батону визначено, що внаслідок надмірної швидкості зниження тиску у вакуумній камері, в об'ємі (м'якушці) батона починається випаровування вологи, в результаті чого виникає перепад тиску між середовищем в об'ємі (м'якушці) батона та середовищем вакуумної камери, як наслідок відбувається руйнування виробу, а саме розтріскування скоринки та відрив м'якушки від нижньої скоринки. Отже обмежуючими параметрами процесу що відбувається у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів є газова проникність скоринки, та структурно-механічні властивості м'якушки. Зазначені параметри визначають гранично допустимі значення швидкості зниження тиску у вакуумній камері, що у свою чергу впливає на конструктивні параметри вакуумної камери (форма, довжина, ширина, висота) обладнання для вакуумного охолодження.

На основі проведених досліджень, виконаних на розробленій експериментальній установці за розробленою методикою, встановлено, що скоринка хліба є основною перешкодою для виходу пари з виробу, тобто характеризується відносно низькою газовою проникністю ($0,32 \dots 0,42 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), тоді як м'якушка має відносно високу газову проникність ($1,5 \dots 9,4 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), що практично не обмежує перебіг процесу вакуумного охолодження. Що дає змогу знехтувати впливом м'якушки на перебіг процесу вакуумного охолодження і зосередити свою увагу на газовій проникності скоринки як одному із факторів який визначає допустиму швидкість зниження тиску у вакуумній камері. Крім того, дослідження структурно-механічних властивостей м'якушки хліба, проведені за розробленою методикою на напівавтоматичному пенетрометрі АП 4/1 з плоским індентором, показали, що границя міцності м'якушки обернено пропорційна до її температури: чим вища температура м'якушки тим менша границя міцності. Таким чином, газова проникність скоринки та структурно-механічні властивості м'якушки є ключовими обмежуючими параметрами при визначенні допустимої швидкості зниження тиску у вакуумній камері, що безпосередньо впливає на конструктивні параметри обладнання для вакуумного охолодження хліба – зокрема геометричних параметрів вакуумної камери (форма, довжина, ширина, висота) та потужність вакуумного насосу.

На основі результатів проведених досліджень розроблено математичну модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату, яка враховує вплив цього процесу на фізико-механічні властивості продукту, та дозволяє визначати такі режимні параметри зниження тиску у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження в часі, за яких не відбувається руйнування продукту. Розроблена математична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату є інструментом в проектуванні обладнання для вакуумного охолодження, який дозволяє визначати як технологічні параметри процесу (тиск, температура, тривалість), так і конструктивні параметри обладнання, а саме: геометричні розміри вакуумної камери (форма, довжина, ширина, висота), параметри накопичувального конвеєра (довжина, кількість секцій, крок переміщення) та завантажувального механізму (тип, швидкість, напрям подачі), дозволяє скласти циклограму роботи апарата.

За результатами досліджень та розрахунків, проведених у рамках наукової роботи, розроблено конструкцію апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва, розроблено циклограму роботи та схему роботи пневмоприводів з електронним керуванням запропонованого обладнання. За допомогою імітаційного моделювання з використанням SOLIDWORKS Simulation виконано перевірку найбільш навантаженого вузла апарату – вузла вакуумування на міцність та деформацію, визначено раціональну будову вакуумної камери.

Результати проведених в роботі комплексних наукових досліджень є основою для практичних рекомендацій по вдосконаленню відомого, або розробці нового обладнання для вакуумного охолодження.

Результати проведених досліджень та запропонована в роботі конструкція апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів обговорені на технічній нараді підприємства ТОВ «КИЇВСЬКИЙ ПЕКАРНИЙ ДІМ» за участю провідних працівників. Висновком підприємства було те, що результати проведеної науково-дослідної роботи мають беззаперечне значення для вдосконалення роботи

підприємств хлібопекарської промисловості не лише України, результати мають бути поширені на весь асортимент хлібобулочних виробів.

Результати науково-дослідної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв.

Ключові слова: вакуумне охолодження, тепломасообмін, структурно-механічні властивості хлібобулочних виробів, математична модель вакуумування, апарат, вакуумна камера апарату, режимні параметри, ефективність.

ABSTRACT

Kozak O.S. Development and justification of parameters of the apparatus for vacuum cooling of bakery products in flow production conditions – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in the Specialization 133 "Industrial Engineering" – National University of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the development of a methodological approach to the design of equipment for vacuum cooling of bakery products in the conditions of in-line production. The basis of the methodological approach is to determine the physical and mechanical parameters of the product affected by the vacuum cooling process and to calculate the operating parameters of this process using the developed mathematical model that takes into account the effect of vacuum cooling on the physical and mechanical parameters of the product. The study reviews the existing methods and equipment for cooling bakery products in a modern bakery enterprise, and analyzes the process of vacuum cooling and its impact on the physical and mechanical characteristics of the product. The physical and mechanical parameters of the product, excessive influence on which can lead to the destruction of products and are the limiting values of the technical parameters of the vacuum cooling apparatus, are determined.

Based on the analysis of methods and equipment for cooling bakery products, it was determined that the vacuum cooling method is promising in terms of energy efficiency and speed of cooling bakery products. At the same time, the existing equipment for vacuum

cooling of bakery products requires manual labor, does not ensure the flow of production, has large free volumes of vacuum chambers, which in turn increases the cooling time and reduces the energy efficiency of the vacuum method of cooling bakery products. This necessitates the creation of an apparatus for vacuum cooling of bakery products in an in-line production.

Based on the studies of the vacuum cooling process on the example of a loaf, it was determined that due to the excessive rate of pressure reduction in the vacuum chamber, moisture evaporation begins in the volume (crumb) of the loaf, resulting in a pressure drop between the medium in the volume (crumb) of the loaf and the vacuum chamber environment, which leads to product destruction, namely, cracking of the crust and detachment of the crumb from the lower crust. Therefore, the limiting parameters of the process in the vacuum chamber of the apparatus for vacuum cooling of bakery products are the gas permeability of the crust and the structural and mechanical properties of the crumb. These parameters determine the maximum permissible values of the rate of pressure reduction in the vacuum chamber, which in turn affects the design parameters of the vacuum chamber (shape, length, width, height) of the vacuum cooling equipment.

Based on the studies carried out on the developed experimental setup according to the developed methodology, it was found that the bread crust is the main obstacle to the escape of steam from the product, i.e., it is characterized by a relatively low gas permeability ($0,32...0,42 \text{ (m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$), while the crumb has a relatively high gas permeability ($1,5...9,4 \text{ (m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$), which practically does not limit the course of the vacuum cooling process. This makes it possible to neglect the influence of the crust on the course of the vacuum cooling process and focus on the gas permeability of the crust as one of the factors that determines the permissible rate of pressure reduction in the vacuum chamber. In addition, the study of the structural and mechanical properties of bread crust, conducted according to the developed methodology using a semi-automatic penetrometer AP 4/1 with a flat indenter, showed that the tensile strength of the crust is inversely proportional to its temperature: the higher the crust temperature, the lower the tensile strength. Thus, the gas permeability of the crust and the structural and mechanical properties of the crumb are the key limiting parameters in determining the permissible rate of pressure reduction in the vacuum chamber,

which directly affects the design parameters of the equipment for vacuum cooling of bread, in particular the geometric parameters of the vacuum chamber (shape, length, width, height) and the power of the vacuum pump.

Based on the results of the conducted research, a mathematical model of the vacuum cooling process in the vacuum chamber of the apparatus has been developed. This model takes into account the influence of the process on the physical and mechanical properties of the product and makes it possible to determine the operating parameters of pressure reduction in the vacuum chamber over time, under which the product remains undamaged. The developed mathematical model of the vacuum cooling process in the vacuum chamber serves as a tool for designing vacuum cooling equipment, enabling the determination of both technological process parameters (pressure, temperature, duration) and structural parameters of the equipment, such as the geometric dimensions of the vacuum chamber (shape, length, width, height), parameters of the accumulation conveyor (length, number of sections, step of movement), and loading mechanism (type, speed, direction of feed). It also allows the development of the operation cycle chart of the apparatus.

Based on the results of the research and calculations carried out as part of the research work, the design of the apparatus for vacuum cooling of bakery products in the conditions of in-line production was developed, the cyclogram of operation and the scheme of operation of pneumatic drives with electronic control of the proposed equipment were developed. With the help of simulation modeling using SOLIDWORKS Simulation, the most loaded unit of the apparatus - the vacuum unit - was tested for strength and deformation, and the rational structure of the vacuum chamber was determined.

The results of the comprehensive scientific research conducted in this work are the basis for practical recommendations for improving the known or developing new equipment for vacuum cooling.

The results of the conducted research and the apparatus design for vacuum cooling of bakery products proposed in this work were discussed at a technical meeting of the enterprise LLC "KYIV BAKERY HOUSE" with the participation of leading specialists. The conclusion of the enterprise was that the results of the research work are of undeniable

importance for improving the operation of bakery industry enterprises not only in Ukraine, but also beyond. The results should be extended to the entire range of bakery products.

The results of the research work are used in the educational process of the Department of Machines and Apparatus of Food and Pharmaceutical Production.

Keywords: vacuum cooling, heat and mass transfer, structural-mechanical properties of bakery products, mathematical model of vacuuming, apparatus, vacuum chamber of the apparatus, operating parameters, efficiency.

Список праць опублікованих за темою дисертації:

Статті у фахових виданнях що індексуються наукометричними базами

1. Kozak, O., & Telychkun, V. (2024), Mathematical model of vacuum cooling process for wheat bread. Ukrainian Food Journal, 13(4), 780–793. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-4-11>.

(Особистий внесок Козак, О.: аналіз літературних джерел, розроблення та розрахунок математичної моделі, підготовка результатів до друку; особистий внесок Telychkun, V.: аналіз результатів виконаної роботи).

URL: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/ufj/2024/4/11.pdf>

(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; міжнародна індексація: Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, UlrichsWeb, CABI full text, Online Library of University of Southern Denmark, DRJI, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI, FSTA, Scopus)

Статті у фахових виданнях України

2. Козак О.С., Теличкун В.І. (2023), Визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона в процесі вакуумного охолодження, Харчова промисловість, № 33-34, С. 62-70. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2023-33-34-9>

(Особистий внесок Козака О.С.: проведення та організація експериментальних досліджень, обробка результатів експериментальних досліджень, підготовка їх до друку; особистий внесок Теличука В.І.: аналіз результатів експериментальних досліджень).

URL: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/fi/2023/33-34/9.pdf>

(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; міжнародна індексація: Google scholar, Index Copernicus)

Козак О.С., Теличкун Ю.С., Теличкун В.І. (2024), Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. Наукові праці НУХТ, 30(4), 90—99. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-4-9>

(Особистий внесок Козака О.С.: проведення та організація експериментальних досліджень, обробка результатів експериментальних досліджень, підготовка їх до друку; особистий внесок Теличука В.І.: аналіз результатів експериментальних досліджень).

URL: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/swnuft/2024/4/9.pdf>

(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; міжнародна індексація: EBSCO, Google scholar, Index Copernicus)

3. Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І. (2025). Аналіз способів і обладнання для охолодження хлібобулочної продукції на сучасних хлібопекарських підприємствах. Наукові праці НУХТ, 31(2), 139—155. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-2-13>

(Особистий внесок Козака О.С.: проведення аналізу та узагальнення літературних джерел, підготовка матеріалів до друку; особистий внесок Теличука В.І.: аналіз результатів проведеного літературного огляду).

URL:

https://drive.google.com/file/d/1Jy9J7T_HgQNInqIYPXglN3JpNu_ocx94/view?usp=drive_link

(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; міжнародна індексація: EBSCO, Google scholar, Index Copernicus)

Статті у інших виданнях України

4. Козак О. С., Десик М.Г., Теличкун Ю.С., Теличкун В. І. (2021). Удосконалення

процесу вакуумного охолодження хліба в потоці. *10-а Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Тренди lean-виробництва та пакування харчової продукції»*, С. 66-70. <https://dspace.nuft.edu.ua/bitstreams/13460867-245d-4670-8acc-4346a242039e/download>

5. Козак О. С., Теличкун В. І. (2023). Розробка та обґрунтування параметрів апарата для вакуумного охолодження батона в умовах потокового виробництва. *12 Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Тренди lean-виробництва та пакування харчової продукції»*. С. 76-80. https://conference.nuft.edu.ua/leanfoodpack/Books/Abstracts/A_2023.pdf

6. Козак О. С., Теличкун В. І. (2024). Математична модель процесу вакуумного охолодження батону. *13 Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Тренди lean-виробництва та пакування харчової продукції»*. С. 68 - 72. https://conference.nuft.edu.ua/leanfoodpack/Books/Abstracts/A_2024.pdf

Статті у закордонних виданнях

7. Kozak, O., Telychkun, I., Desyk, M., & Telychkun, V. (2020). Research of the process of vacuum cooling of bread. *Proceedings of University of Ruse “Angel Kanchev”*, 59(10.3), 13–17. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/e0110468-608b-4fbe-bb53-11fe2fad6c9d/content>

8. Kozak, O., Nazarenko, I., Desyk M., & Telychkun, V. (2020). Gas permeability of bread. *Proceedings of University of Ruse “Angel Kanchev”*, 59(10.2), 20–25. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/db59e61d-2eeb-4a19-b021-97c3c6137337/content>

9. Kozak, O., Nazarenko, I., Desyk, M., Telychkun, Y., & Telychkun, V. (2021). Influence of vacuum cooling method on quality indices of bread. *Proceedings of University of Ruse*, 60(10.2), 20–23. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a026bfa5-aeef-4908-a9fa-e5eda798a032/content>

Тези доповідей та матеріали конференцій

10. Kozak, O., Nazarenko, I., Desyk, M., & Telychkun, V. (2020). Influence of cooling of bakery products in the conditions of rarefaction on quality of finished products. *Student in Bucovina: Proceedings of the International Conference for Students*, 18 December 2020

(p. 39). Romania. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/35274b11-21be-45c5-b317-ddb143a33489/content>

11. Козак О., Теличкун І., Арсеньєва Л. (2020). Технологічні аспекти охолодження хлібобулочних виробів в умовах вакууму. Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: матеріали 86 - ї Міжнародна наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч. 1, 48. Київ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/91f2f785-ce7c-4c04-a618-35976815daeb/content>

12. Козак, О. , Десик, М., Теличкун, В. (2020). Експериментальна установка для дослідження вакуумно-випарного охолодження хлібобулочних виробів після випічки. Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: матеріали 86 - ї Міжнародна наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч. 2, 35. Київ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8c953ba0-dbd4-4278-8aa1-83e807efebcc/content>

13. Козак О., Назаренко І., Десик М., Теличкун В. (2021). Вплив вакуумного способу охолодження на якісні показники батону. Матеріали 87-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові досягнення молоді – вирішення проблем харчування людини в ХХІ столітті», 15–16 квітня, ч. 2, 18. Київ: НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/576344c8-4993-4f7f-81b7-a2e12485049c/content>

14. Telychkun, V. I., Desyk, M. G., Nazarenko, I. V., & Kozak, O. S. (2020). Gas permeability of bread. Ruse University. Proceedings, 59(10.2).

15. Козак, О., Назаренко, І., Десик, М., & Теличкун, В. (2022). Вакуумний спосіб охолодження хліба та його вплив на якісні показники батону. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: Програма і матеріали 88-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, квітень–травень 2022 р. (Ч. 2, с. 10). Київ: НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c9bbcec4-2d6c-407b-82b5-4174e95936e9/content>

16. Козак, О., Назаренко, І., Десик, М., & Теличкун, В. (2023). Визначення газової проникності скоринки батону в процесі вакуумного охолодження. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Програма і матеріали 89-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 3–7 квітня 2023 р. (Ч. 2, с. 22). Київ: НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/80a513ff-d5e0-4913-9208-e8739ef7e746/content>
17. Kozak, O., Nazarenko, I., Desyk, M., Telychkun, Y., & Telychkun, V. (2021). Influence of vacuum cooling method on quality indices of bread. Proceedings of University of Ruse, 60(10.2), 20
18. Козак, О. С., Назаренко, І. В., Теличкун, В. І., & Теличкун, Ю. С. (2023). Визначення структурно-механічних властивостей складних дисперсних систем на прикладі м'якушки батона. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та післявоєнної відбудови: виклики для України та світу», присвяченої 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, сек. 3, 396-398. Київ, Україна. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u381/sekciya_3.pdf
19. Kozak O. S., Telichkun V. I. (2023). The influence of crust permeability on vacuum cooling of bread. International Conference "Biotechnologies, Present and Prospects", Suceava, Romania, 9th edition, December 15, 2023.
20. Козак, О., Телічкун, Ю. (2024). Вакуумне охолодження хліба, метод визначення реологічних властивостей м'якушки батона. Матеріали 90-ї міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові досягнення молоді – вирішення проблем харчування людини в XXI столітті», 11–12 квітня, ч. 2, 12. Київ: НУХТ. https://conference.nuft.edu.ua/young/Books%20of%20abstracts/2024/Part_2.pdf
21. Козак, О., Телічкун, Ю. (2024). Використання вторинних енергетичних ресурсів у хлібопекарській промисловості для підвищення ефективності виробництва. Матеріали 90-ї міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові досягнення молоді – вирішення проблем харчування людини в

XXI столітті», 11–12 квітня, ч. 2, 22. Київ: НУХТ.

https://conference.nuft.edu.ua/young/Books%20of%20abstracts/2024/Part_2.pdf

22. Козак, О., Телічкун, В. (2025). Перспективи застосування вакуумного охолодження у хлібопекарському виробництві. Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 7–11 квітня 2025 р. – Київ: НУХТ, – Ч.2.

https://conference.nuft.edu.ua/young/Books%20of%20abstracts/2025/Part_2.pdf

23. Козак, О., Телічкун, В. (2025). Вибір матеріалів та оптимізація конструкції вакуумної камери для охолодження хлібобулочних виробів. Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 7–11 квітня 2025 р. – Київ: НУХТ, – Ч.2.

https://conference.nuft.edu.ua/young/Books%20of%20abstracts/2025/Part_2.pdf

Патенти

24. Патент на корисну модель № 156000, МПК А21D15/02, А21D17/00. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з рухомим столиком [Електронний ресурс] / Десик М. Г., Телічкун В. І., Телічкун Ю. С., Козак О. С. ; заявник Національний університет харчових технологій. – № у 2023 05202 ; заявл. 02.11.2023 ; опубл. 24.04.2024, Бюл. № 17. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/652d8756-b25c-4981-83b1-ea5a4f3e020d/content>

25. Патент на корисну модель № 156905, МПК А21D15/00, А21D17/00. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з завантажувальним пристроєм [Електронний ресурс] / Десик М. Г., Телічкун В. І., Телічкун Ю. С., Козак О. С. ; заявник Національний університет харчових технологій. – № у 2023 05199 ; заявл. 02.11.2023 ; опубл. 21.08.2024, Бюл. № 34. – Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/aff13eed-ce8c-47f3-8527-ed7c437d3c2/content>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОСОБІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ НА СУЧАСНИХ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ВИРОБНИЦТВАХ.....	24
1.1 Охолодження хлібобулочних виробів в умовах сучасного хлібопекарського виробництва.....	24
1.2 Огляд сучасного стану досліджень процесу вакуумного охолодження харчових продуктів.....	27
1.3 Аналіз існуючого обладнання для охолодження хлібобулочних виробів.....	31
1.4 Основні методологічні засади проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.....	37
1.5 Висновки до розділу та постановка задач досліджень.....	38
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ.....	41
2.1 Експериментальні установки та методики досліджень для обґрунтування параметрів апарату для вакуумного охолодження.....	41
2.2 Методика дослідження міцності та деформації конструктивних елементів апарату за допомогою імітаційного моделювання.....	51
2.3 Висновки до розділу.....	53
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ У ВАКУУМНІЙ КАМЕРІ АПАРАТУ.....	55
3.1 Фізико-механічні властивості батона.....	55
3.2 Підґрунтя для побудови математичної моделі процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату.....	65
3.3 Аналітична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату.....	69
3.4 Алгоритмічна модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату.....	74

3.5 Узагальнена математична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату.....	75
---	----

3.6 Результати математичного моделювання процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату	76
--	----

3.7 Висновки до розділу.....	78
------------------------------	----

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ БАТОНУ.....80

4.1 Розгляд структури обладнання для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва	80
---	----

4.2 Визначення кута приймальної гірки апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва.....	87
---	----

4.3 Визначення закону руху завантажувального механізму апарату для вакуумного охолодження хліба.....	89
--	----

4.4 Аналіз раціональної кількості батонів у вакуумній камері апарату....	92
--	----

4.5 Визначення площі контакту вакуумної камери з ущільненням.....	100
---	-----

4.6 Визначення раціональних конструктивних параметрів вакуумної камери..	104
--	-----

4.7 Визначення закону руху батону в апараті для вакуумного охолодження хліба	119
--	-----

4.8 Висновки до розділу.....	122
------------------------------	-----

РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ.....123

5.1 Рекомендації щодо режимних параметрів для проведення процесу вакуумного охолодження батону в умовах потокового виробництва.....	123
---	-----

5.2 Циклограма роботи апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва.....	124
--	-----

5.3 Схема роботи пневмоприводів з електронним керуванням апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва	127
--	-----

5.4 Будова та принцип роботи апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва.....	129
5.5 Висновки до розділу.....	132
ВИСНОВКИ	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	136
ДОДАТОК 1	152
ДОДАТОК 2	157
ДОДАТОК 3	159

ВСТУП

Актуальність теми. Упродовж тривалого періоду на виробництвах харчових продуктів зосереджують все більше уваги на оптимізації технологічних процесів, зниженню енерговитрат і собівартості продукції, розширенню асортименту, прискоренню виробничих процесів і скороченню часу охолодження готових виробів, зокрема на хлібопекарських підприємствах.

На сучасних хлібопекарських підприємствах поширення набули два способи охолодження: природний (конвективний) та з використанням кондиціонованого повітря. Серед недоліків цих способів охолодження, що застосовуються у виробництві, можна виділити значну тривалість процесу, великі розміри та масу обладнання, складну систему транспортерів, вимоги до умов робочого повітря, нерівномірність охолодження, необхідність використання ручної праці, та бактеріальне забруднення виробів.

Одним із шляхів інтенсифікації технологічного процесу охолодження готових хлібобулочних виробів є впровадження вакуумного способу охолодження на підприємствах, який базується на охолодженні вологих продуктів із достатньою газо та паропроникністю.

Вакуумний спосіб охолодження є інноваційним підходом, який значно скорочує час охолодження хлібобулочних виробів. Процес ґрунтується на адіабатному кипінні вологи, що відбувається всередині продукту під час зниження тиску у вакуумній камері, що, у свою чергу, забезпечує інтенсивне відведення тепла.

Вакуумний спосіб охолодження має низку переваг, серед яких скорочення тривалості охолодження, покращення структурно-механічних властивостей хліба, подовження терміну його зберігання, зниження ризику бактеріального забруднення хліба.

Протягом декількох десятиліть дослідження процесу вакуумного охолодження хліба проводяться як іноземними, так і вітчизняними науковцями, зокрема співробітниками НУХТ. Однак для впровадження цього способу охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва необхідно вдосконалити як теоретичні основи, так і параметри процесу, за допомогою проведення додаткових

досліджень. Це пов'язано з тим, що внаслідок надмірної швидкості зниження тиску у вакуумній камері, в середині батону починається інтенсивне випаровування вологи, в результаті чого виникає перепад тиску між середовищем в середині батону та середовищем вакуумної камери, як наслідок відбувається руйнування виробу, а саме розтріскування скоринки та відрив м'якушки від нижньої скоринки.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-практичної задачі – створення конструкції апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів у потоковому виробництві, розробку методики досліджень і розрахунку параметрів процесу на прикладі батона, а також удосконалення теорії вакуумного охолодження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися відповідно до плану науково-дослідних робіт за основними напрямками наукової діяльності Національного університету харчових технологій: "Розроблення наукових основ технологічних процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв із метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації", відповідно до плану кафедральної держбюджетної науково-дослідної роботи «Науково-технічні засади створення енергоощадних та ресурсозберігаючих процесів і обладнання харчових, фармацевтичних й поліграфічно-пакувальних виробництв» (номер державної реєстрації 0121U100057).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва, розробка комплексної методики досліджень та розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, зокрема на прикладі батона, що включає визначення оптимальних умов охолодження, аналіз впливу різних параметрів на ефективність процесу та розробку рекомендацій щодо їхнього застосування в умовах реального виробництва.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналітичний огляд способів та обладнання для охолодження хлібобулочних виробів на сучасних хлібопекарських виробництвах;
- визначити вплив процесу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів;
- розробити методики та лабораторні установки для виконання досліджень впливу процесу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів;
- розробити математичну модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів яка враховуватиме вплив цього процесу на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів;
- визначити режимні параметри процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату для охолодження батону в умовах потокового виробництва;
- розробити конструкцію апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва, та сформулювати рекомендації щодо параметрів проведення процесу вакуумного охолодження на прикладі батона.

Об'єктом дослідження – є апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

Предмет дослідження – конструктивні параметри апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, їх вплив на швидкість охолодження, структурно-механічні властивості та якісні показники готової продукції.

Методи досліджень. Вирішення завдань, поставлених у дисертаційній роботі, здійснювалося з використанням стандартних та загальноприйнятих методів дослідження.

Теоретичні дослідження включали аналітичний огляд і узагальнення наукової літератури, а також розробку математичної моделі для визначення режимних параметрів процесу що відбувається у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, яка базується на розрахунках процесів випаровування вологи, теплопередачі, масообміну, газовій проникності скоринки та м'якушки хліба а також структурно-механічних властивостях м'якушки хліба.

Експериментальні дослідження проводилися за допомогою розроблених методик та експериментального обладнання, зокрема вакуумної експериментальної установки та установки для визначення газової проникності скоринки та м'якушки хліба. Для визначення структурно-механічних властивостей м'якушки хліба за розробленою методикою використовувався напівавтоматичний пенетрометр АП 4/1 з плоским індентором.

Дослідження на міцність та деформацію найбільш навантаженого вузла апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва проводилися за допомогою імітаційного моделювання з використанням SOLIDWORKS Simulation.

Дослідження проводилися як у лабораторних, так і у виробничих умовах. Обробка отриманих результатів та розрахунки виконувалися за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel 2013 та SOLIDWORKS.

Наукова новизна. В ході теоретичних та експериментальних досліджень отримані наступні нові результати:

- встановлено закономірність впливу режимних параметрів зниження тиску у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів, що дає змогу обґрунтувати параметри обладнання, зокрема: тривалість одного циклу охолодження, допустиму швидкість зниження тиску у вакуумній камері;
- визначено залежність перепаду тиску між середовищем вакуумної камери та середовищем в об'ємі (м'якушці) батона, структурно-механічними властивостями м'якушки та температурою м'якушки батона, що дозволяє встановити: допустиму швидкість зниження тиску, за якої зберігається цілісність виробу;
- розроблено математичну модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату, яка враховує вплив цього процесу на фізико-механічні властивості хлібобулочних виробів, дає змогу прогнозувати ефективність охолодження, оптимізувати технологічні параметри процесу (тиск, температура, тривалість), та обґрунтувати: кількість виробів що одночасно охолоджуються, раціональні

геометричні розміри вакуумної камери, параметри накопичувального конвеєра та завантажувального механізму, скласти циклограму роботи апарата;

- обґрунтовано метод вибору конструктивних параметрів апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва з врахуванням: тривалості циклу охолодження, допустимої швидкості зниження тиску у вакуумній камері, кількості виробів що одночасно охолоджуються;
- визначено необхідні конструктивні елементи апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва, зокрема: приймальна гірка, накопичувальний конвеєр, завантажувальний механізм, рухома вакуумна камера роз'ємного типу з нерухомим вакуумним столиком, розвантажувальний конвеєр;
- визначено вплив зовнішнього тиску та конструктивних параметрів вакуумної камери на її міцнісні та експлуатаційні показники під час охолодження хліба що дозволило обґрунтувати: необхідну товщину стінок, раціональну будову вакуумної камери, вибір матеріалу вакуумної камери;

Практичне значення отриманих результатів. Результати проведених наукових досліджень стали основою для практичних рекомендацій щодо вдосконалення теорії процесу вакуумного охолодження, оптимізації режимних параметрів цього процесу, та створенню нового обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва що відповіде критеріям технічної ефективності.

В ході проведеної науково-дослідної роботи отримані наступні результати:

- розроблено методологічний підхід до дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів;
- розроблено методику проведення досліджень та експериментальну установку для визначення газової проникності скоринки та м'якушки хліба
- розроблено методику проведення досліджень на напівавтоматичному пенетрометрі АП 4/1 з плоским індентором для визначення структурно-механічних властивостей м'якушки хліба;

- визначено раціональний режим зміни тиску у вакуумній камері під час охолодження батона з пшеничного борошна вищого гатунку масою 0,5 кг;
- розроблено конструкцію апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва;
- результати досліджень та конструкція апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва обговорені на технічній нараді ТОВ «КИЇВСЬКИЙ ПЕКАРНИЙ ДІМ». Підприємство підтвердило значний потенціал результатів для вдосконалення хлібопекарської промисловості України та рекомендувало їх застосування для всього асортименту хлібобулочних виробів.
- результати науково-дослідної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв НУХТ.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в аналізі та узагальненні літературних джерел, розробці методологічного підходу до дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, створенні методик проведення досліджень і лабораторних установок, проведенні експериментів, обробці та аналізі отриманих даних, формулюванні висновків, розробці математичної моделі процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, розрахунку математичної моделі та формуванні рекомендацій щодо режимних параметрів процесу вакуумного охолодження батону, розробці та патентуванні конструкції апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва.

Підготовка завдань, вибір методів досліджень, аналіз та узагальнення результатів виконані разом з науковим керівником к.т.н. проф. Теличкуном В.І.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й схвалені на наукових конференціях: 87 – 91 Міжнародні наукові конференція молодих учених та студентів «Наукові досягнення молоді до вирішення проблеми харчування XXI століття» (Київ, 2021-2025); «Biotechnologies and food technologies», (Ruse, 2020); International conference for students “STUDENT IN BUCOVINA” (Suceava, 2020); 10, 12-13 Міжнародних спеціалізованих

науковопрактичних конференціях Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції (Київ, 2021 – 2023);

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 26 публікацій; 3 – статті у фахових виданнях України; 3 – статті у інших виданнях України; 3 - статті у закордонних виданнях; 1 - стаття у фахових виданнях що індексуються наукометричними базами; 14 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції; 2 патенти на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків. Основний зміст дисертації викладено на 160 сторінках (з врахуванням таблиць та рисунків). Повний список використаних літературних джерел містить 134 найменування.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОСОБІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ НА СУЧАСНИХ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ВИРОБНИЦТВАХ

1.1 Охолодження хлібобулочних виробів в умовах сучасного хлібопекарського виробництва.

Охолодження - це важливий етап виробництва хлібобулочних виробів, який впливає на якісні показники готової продукції та її придатність до реалізації [3]. Охолодження проводять для запобігання утворення конденсату в упаковці, надання необхідних структурних властивостей, що дозволяють проводити нарізання, а також для покращення транспортабельності [20]. Гаряча хлібобулочна продукція чутлива до механічного впливу, рекомендована максимальна температура для проведення процесів нарізання та пакування складає 30 °С [74].

На практиці використовують три способи охолодження хлібобулочних виробів: природний (конвективний), охолодження конденціонованим повітрям та вакуумний [9].

Природне (конвективне) охолодження – це найдавніший і найпростіший спосіб охолодження, який полягає у поступовому зниженні температури готових виробів за рахунок контакту з навколишнім середовищем [9]. Цей спосіб охолодження має свої переваги та недоліки.

Переваги природного способу охолодження:

- Збереження смаку та аромату. При повільному охолодженні волога рівномірно розподіляється в об'ємі виробу, що сприяє насиченості його смаку та аромату [32].
- М'яка скоринка. Поступове охолодження дозволяє скоринці стати більш м'якою [40].
- Економія енергії. Не вимагає додаткових енерговитрат, на відміну від інших способів охолодження [9].
- Простий у виконанні. Не потребує спеціального обладнання.

Недоліки природного способу охолодження:

- Тривалість процесу. Охолодження може зайняти значний час, що може бути недоцільним для великих обсягів виробництва [7].

- Ризик утворення конденсату. При високій вологості повітря на поверхні хліба може утворюватися конденсат, що може призвести до пліснявіння [9].
- Нерівномірне охолодження. Великі хліби можуть охолоджуватися нерівномірно, що може вплинути на їхню якість [32].
- Ризик бактеріальної забрудненості. Тривале перебування виробів на відкритому повітрі, обумовлює осідання пилу з навколишнього середовища на виробах, як наслідок збільшується ризик утворення плісняви, зменшується термін придатності [69].

Охолодження хлібобулочних виробів кондеціонованим повітрям – це один із найпоширеніших способів охолодження готових виробів на хлібопекарських підприємствах [5]. Цей спосіб дозволяє досягти оптимальних умов для охолодження великих об'ємів продукції за відносно короткий час [9].

Процес охолодження кондеціонованим повітрям передбачає створення спеціальних камер, в яких підтримується певний рівень температури та вологості. Гарячі хлібобулочні вироби розміщують на спеціальних стелажах або конвеєрах [8]. Потім через камери пропускається кондеціоноване повітря, яке відбирає тепло від виробів і поступово знижує їхню температуру [93].

Основні параметри охолодження хлібобулочних виробів кондеціонованим повітрям [90]:

- Температура повітря – зазвичай підтримується в діапазоні 15...25 °C [35].
- Вологість повітря – залежить від типу хлібобулочного виробу і варіюється в межах 60...80 % [35].
- Переваги охолодження хлібобулочних виробів кондеціонованим повітрям [118]:
- Швидкість. Використання кондеціонованого повітря дозволяє значно швидше охолодити великі об'єми продукції в порівнянні з природним охолодженням [118].
- Рівномірність. Кондеціоноване повітря забезпечує рівномірне охолодження по всій поверхні виробу [118].

- Контрольовані умови. Можливість точного регулювання температури і вологості робочого повітря, дозволяє оптимізувати процес для різних типів виробів [73].

- Механізація. Процес охолодження може бути повністю механізованим, що знижує трудові витрати [92].

Недоліки охолодження хлібобулочних виробів конденційованим повітрям [90]:

- Цей спосіб потребує енерговитрат на кондиціонування повітря та роботу вентиляційних систем і обладнання [90].

- Ризик пересушення. При неправильно підібраних параметрах може відбуватись пересушування поверхні виробів, що негативно впливає на їхню якість [90].

- Металоємність. Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів конденційованим повітрям займає великі виробничі площі, як наслідок має велику металоємність [90].

Вакуумне охолодження – це інноваційний спосіб, який знаходить все ширше застосування у хлібопекарській промисловості. Цей спосіб передбачає зниження тиску в камері, де розміщені хлібобулочні вироби, що призводить до інтенсивного випаровування вологи з поверхні продуктів і, відповідно, до їх швидкого охолодження [76].

Переваги вакуумного охолодження хлібобулочних виробів [45]:

- Швидкість. Процес охолодження відбувається в рази швидше, ніж при традиційних способах [8].

- Збереження якості. Відсутність конденсату та пилу на поверхні продуктів запобігає розмоканню скоринки, зберігається хрумкість скоринки [25].

- Збереження кольору. Швидке охолодження дозволяє зберегти колір виробу [47].

- Збільшення терміну зберігання. Швидке охолодження запобігає бактеріальному забрудненню виробів, як наслідок збільшується термін зберігання [25].

Недоліки вакуумного охолодження хлібобулочних виробів [45]:

- Більший відсоток усихання в порівнянні з іншими способами охолодження [45].
- Не реалізований в умовах потокового виробництва.

Отже вакуумний спосіб охолодження – перспективний спосіб, який дозволяє значно покращити якість, і збільшити термін зберігання хлібобулочних виробів [44].

1.2 Огляд сучасного стану досліджень процесу вакуумного охолодження харчових продуктів.

На практиці використовуються природні та штучні способи охолодження. У холодильній промисловості часто використовують охолодження шляхом випаровування рідини. До природних способів відносять охолодження, що відбувається завдяки випаровуванню вологи[56], зокрема за допомогою вакуум-охолоджувачів [88]. Штучне охолодження здійснюється із використанням повітря в охолоджувальних камерах або розсолу в трубчастих охолоджувачах [88]. Зниження температури під час вакуумного охолодження відбувається в наслідок випаровування вологи, що переходить у пароподібний стан [56]. Зазвичай вода кипить за температури 100°C та атмосферному тиску (101,325 кПа) змінюючи агрегатний стан з рідкого в газоподібний, забираючи тепло на випаровування і не дозволяючи температурі води піднятися вище вказаної [8]. Зниження тиску у вакуумній камері спричиняє зменшення температури кипіння води, внаслідок чого відбувається адіабатне кипіння вологи, що й забезпечує охолодження продукту [8], а час охолодження скорочується, хоча одночасно збільшується втрата вологи на 1,5...2 % [113].

Вакуумне випаровування використовується у вакуум-випарних апаратах, які є частиною виробничих ліній для виготовлення продуктів переробки фруктів і овочів, таких як джеми, варення, дитяче харчування, концентровані соки, пюре та томатна паста. Цей процес також застосовується у виробництві сухого та згущеного молока, молочних сумішей, а також для уварювання різних мас у численних галузях промисловості, зокрема у фармацевтичній [49].

Вакуум-випарні установки використовуються для варіння, уварювання, випарювання, охолодження та концентрації продуктів. Концентрація продуктів

через випарювання у вакуумі допомагає підвищити їх харчову цінність, забезпечити тривале зберігання та зручність транспортування. [39].

Вакуум-випарний апарат — це обладнання, в якому проводяться процеси концентрації, осушення та охолодження розчинів нелетких речовин за рахунок часткового видалення розчинника під час кипіння рідини в умовах зниженого тиску. [37]. Випарювання в умовах розрідження дозволяє проводити процес при нижчих температурах, що запобігає руйнуванню речовин, які схильні до розкладу. У фармацевтичній промисловості вакуум-випарний апарат використовується для концентрування розчинів, які киплять при високих температурах, з метою зменшення витрат енергоносіїв та скорочення часу технологічного процесу, а також для обробки розчинів термолабільних речовин [53].

Вакуумне охолодження використовується для збереження зелені та свіжих овочів і є популярним у США, Європі та Китаї. Завдяки енерговитратам, що супроводжують випаровування води при низькому тиску, температуру свіжого продукту можна знизити ефективно з 28 °C до 2 °C. Процес охолодження відбувається порціями, з часом охолодження однієї порції від 15 до 30 хвилин. Типове обладнання здатне обробляти кілька тонн продукту за раз, який зазвичай розміщується на піддонах або візках [62].

Під час вакуумного охолодження продукт розміщують у сталевій камері, де вакуумні насоси знижують тиск до рівня приблизно 0,6 кПа, вода закипає в умовах розрідження від 4 до 2,6 кПа залежно від початкової температури [41]. Це спричиняє інтенсивне випаровування вологи з продукту та його швидке охолодження. Наприкінці циклу охолодження тиск у камері становить близько 0,6 кПа, при якому вода закипає вже за температури 0 °C [85].

Якщо продукт перебуває під таким тиском достатньо довго, його температура може знизитися до 0 °C. Втрати маси під час вакуумного охолодження зазвичай становлять від 2 до 4 % від початкової ваги, залежно від температури на початку процесу та теплоємності продукту [99]. Попереднє обприскування продукту водою перед початком вакуумного охолодження дозволяє зменшити втрати вологи та, відповідно, знизити втрати маси.

Звичайний цикл вакуумного охолодження починається з завантаження рослинної або іншої продукції до вакуумної камери, після чого камера герметично закривається [120]. Після герметизації камери вмикається вакуумний насос, який знижує тиск до рівня, що відповідає потрібній температурі кипіння вологи всередині продукту. Початковий етап відкачування повітря зазвичай триває близько 5...10 хвилин [35]. Залежно від розмірів вакуумної камери та продуктивності вакуумного насоса. Загальна тривалість охолодження визначається формою продукту, його пористістю, розмірами пор, наявністю вільної вологи в них, а також рівнем тиску в системі [87]. Момент, коли тиск у вакуумній камері досягає початкового робочого рівня, вважається точкою спалаху процесу вакуумного охолодження [88]. Зазвичай тиск у вакуумній камері потрібно знижувати до точки спалаху якомога швидше, оскільки до цього моменту вакуумний насос відкачує лише повітря, і охолодження не відбувається [87]. Коли досягається точка спалаху, волога починає випаровуватися. Пара, що утворюється, потім видаляється або через вакуумний насос, або шляхом конденсації, якщо в системі є конденсатор для створення розрідження [125].

Тиск у вакуумній камері продовжує знижуватися, що спричиняє подовження процесу випаровування. Охолодження триває, поки температура продукту не досягне бажаного рівня для зберігання або подальшої обробки [105]. Після цього процес завершується, відкривається вентиляційний клапан, і повітря знову заповнює камеру. Продукція вивантажується з камери та переміщується на зберігання або подальшу обробку при необхідній температурі [90].

Вакуумне охолодження досліджується вже кілька десятиліть. Наприклад, у 1950 році в Сполучених Штатах цей спосіб почали використовувати для охолодження плодоовочевої сировини, що допомогло вирішити проблему її швидкого псування. У 1984 році А. Томсон з Великої Британії довів, що застосування вакууму для охолодження грибів і свіжого салату сприяє продовженню їх терміну зберігання та зменшенню забруднення мікроорганізмами. [40]. У 1983 році З. Шен (Італія) успішно застосував вакуумне охолодження для охолодження печених і варених продуктів. Згодом цей спосіб почали використовувати й для

ковбасних виробів з метою скорочення часу технологічного процесу [32]. У 1993 році Д. Еверінгтон (Ізраїль) виявив, що охолодження італійського пирога за допомогою вакууму можна здійснити за 4 хвилини, що значно швидше за традиційний метод охолодження повітрям, який займає 24 години [32]. У 2001 році К. Мак-Доналд (Англія) підтвердив, що швидкість охолодження є ключовим фактором, виявивши тісний зв'язок між якістю продукту та швидкістю цього процесу. Ця величина залежить від умов тепловідведення, форми, розмірів продукції та її теплофізичних властивостей [51]. В даний час тривають дослідження щодо використання вакуумного охолодження у виробництві хлібобулочних виробів. Зокрема, компанія Revent International AB (Данія) активно сприяє впровадженню цієї технології, встановлюючи вакуумні охолоджувачі в кондитерських, міні-пекарнях, кафе та ресторанах [29].

Модульоване вакуумне охолодження хлібобулочних виробів було розроблено понад 40 років тому в Сполученому Королівстві і спочатку застосовувалося здебільшого для охолодження пирогів і великих хлібів [81]. Однак через складність контролю процесу та необхідність розробки індивідуальних параметрів охолодження для кожного виду і рецепту продукції хлібопекарської галузі, ця технологія не здобула великої популярності [81]. З погляду фізики, вакуумне охолодження ґрунтується на взаємозв'язку між тиском і температурою кипіння води, і використовується для охолодження продуктів, що мають вологу [72]. герметичній камері створюється вакуум, який знижує точку кипіння води, через що волога в продукті починає випаровуватися. Під час випаровування волога забирає тепло з продукту, що забезпечує його швидке охолодження зсередини назовні [13].

1.3 Аналіз існуючого обладнання для охолодження хлібобулочних виробів

Охолодження природним (конвективним) способом

На багатьох підприємствах до цього часу охолодження хлібобулочних виробів здійснюють використовуючи природний (конвективний) теплообмін з навколишнім середовищем. Використання цього способу охолодження хлібобулочних виробів не

вимагає значних енерговитрат, при цьому кінцева температура та швидкість процесу залежать від температури навколишнього середовища [93].

Природний спосіб охолодження реалізується за допомогою вагонеток та спіральних охолоджувачів.

Вагонетка (рис. 1.1) використовується для охолодження, зберігання та транспортування готових хлібобулочних виробів, розміщених на дерев'яних або пластикових лотках [36].

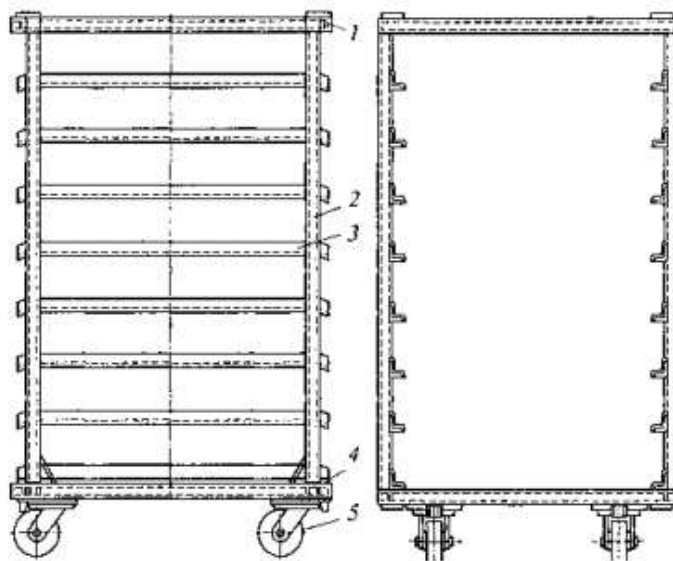


Рис. 1.1. Вагонетка для охолодження хлібобулочних виробів природним способом:

**1 – верхня напрямна; 2 – вертикальні стійки; 3 – напрямні; 4 – нижня рама;
5 – колесо**

Охолодження природним (конвективним) способом, готових продуктів хлібопекарської галузі за допомогою вагонеток, має певні недоліки [83]:

- тривалість процесу охолодження (від 2,5 до 6 год) [83];
- займає значну частину загальної виробничої площі [83];
- високий ризик бактеріального забруднення, початок черствіння в наслідок тривалого контакту з навколишнім середовищем [126];
- необхідність підтримання оптимальної температури та вологості в приміщеннях, особливо в літній період [126];
- необхідність використання ручної праці.

Для механізації процесу охолодження хлібобулочних виробів на підприємствах впроваджено спіральні охолоджувачі (рис 1.2.) [25].



Рис. 1.2. Спіральний охолоджувач для хлібобулочних виробів

Впровадження спіральних охолоджувачів у технологічну схему виробництва сприяє рівномірному охолодженню хлібобулочних виробів перед їх нарізанням та пакуванням. Це допомагає зменшити ризик порушення санітарно-гігієнічних норм, оптимізувати використання виробничих площ, механізувати заключні етапи виробничого процесу та покращити культуру виробництва [83]. Одним з технологічних рішень для автоматизації такого тривалого процесу є впровадження спірального конвеєра (спірального охолоджувача). Зважаючи на спіральну геометрію розташування стрічки в просторі, стає можливим накопичення великої довжини стрічки в мінімальному об'ємі, що дозволяє істотно зекономити виробничі площі [29]. Крім того, на стрічці спірального охолоджувача продукт транспортується максимально делікатно, без зміни свого положення відносно стрічки.

Охолодження конденціонованим повітрям

На хлібопекарських підприємствах для механізації та прискорення процесу охолодження хлібобулочних виробів дедалі частіше використовують охолодження за допомогою кондиціонованого повітря [90]. Використання такого способу дозволяє скоротити процес охолодження.

Подача повітря при такому способі, здійснюється за рециркуляційною схемою. Гаряче повітря відбирається з верхньої зони охолодження, потім зволожується та охолоджується в кондиціонері, після чого повертається в охолоджувач. Це може відбуватися через зону з продуктом, що має найнижчу температуру, або двома потоками: один – до зони з гарячим виробом, а інший – до зони зниженої температури [70].

Застосування двох потоків повітря підвищує ефективність охолодження та знижує втрати вологи. Для охолодження хліба оптимальними є температура повітря в межах 15...25 °С та відносна вологість 60...80 %. [131].

Охолодження конденціонованим повітрям здійснюється за допомогою охолоджувальних конвеєрів, коліскових та спіральних кулерів.



Рис. 1.3. Охолоджувальний конвеєр КОХ-2 для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондинціонованого повітря

Використання охолоджувальних конвеєрів з кулерами, що нагнітають кондиціоноване повітря (рис. 1.3), у технологічній схемі виробництва хлібобулочних виробів забезпечує рівномірне охолодження виробів, які потім подаються на нарізання та пакування. Це знижує ризик порушення санітарно-гігієнічних норм, сприяє раціональному використанню виробничих площ, механізує завершальні етапи виробництва та підвищує культуру виробництва [83].

Колисковий кулер (рис. 1.4) марки КЛ-1 призначений для охолодження виробів масою 0,5 кг протягом 55–60 хвилин у кількості 2400 штук, які випікаються в тунельній печі, а також для подачі охолоджених виробів на нарізання та упаковку [9].

Колисковий кулер працює за принципом вистійної шафи. Гарячі вироби розташовуються в кошиках гребінчасто-гратчастого типу, що забезпечує рівномірне їх охолодження.

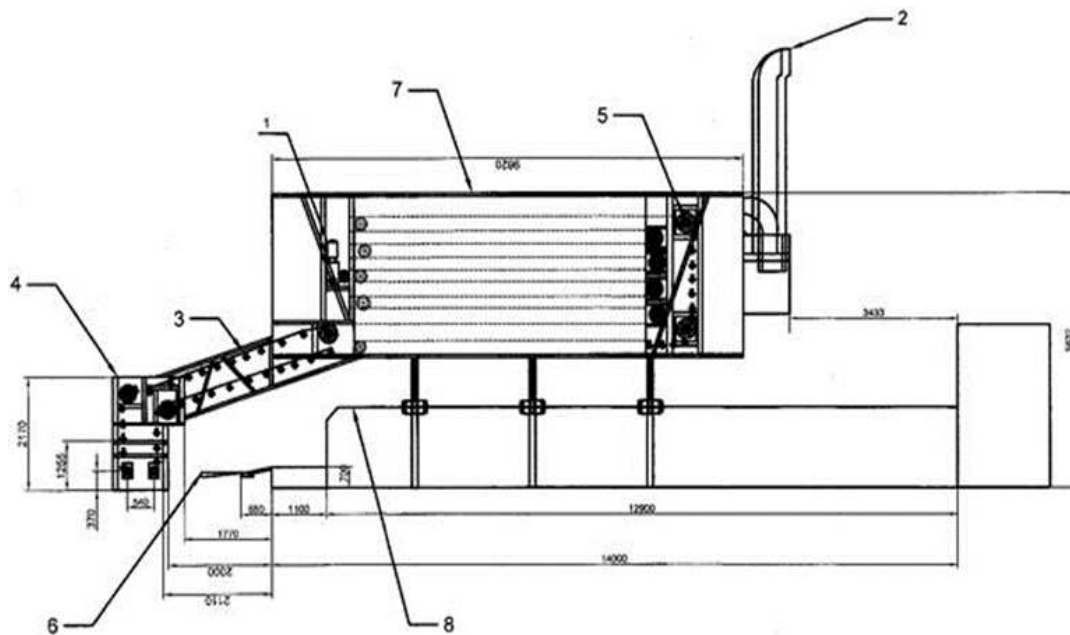


Рис. 1.4. Колисковий кулер для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондинціонованого повітря

Спиральний кулер (рис. 1.5) використовується для швидкого охолодження хлібобулочних виробів, має компактні розміри та характеризується високою енергоефективністю [116].

Спиральний кулер включає подвійний спіральний конвеєр, охолоджувальну камеру, холодильний агрегат та додаткові транспортери. Привід конвеєра оснащений частотним перетворювачем, що дозволяє безступінчато регулювати його швидкість руху [116]. Це забезпечує високу точність регулювання продуктивності системи та рівня охолодження. Система допоміжних транспортерів може включати кілька прямих, поворотних, підйомних або опускних конвеєрів. Кількість та конфігурація транспортерів визначаються плануванням цеху та методами організації виробничих процесів. [116].



Рис. 1.5. Спіральний кулер для охолодження хлібобулочних виробів з використанням конденціонованого повітря

Відносна вологість повітря в охолоджувачі повинна становити близько 60...80 %. Для охолодження 1 кг хліба в годину витрачається 1 кг повітря при температурі 15...18 °С. Для зрошування камери в кондиціонері на 1 кг повітря витрачається від 0,9–1,4 до 1,8...2,7 кг води. [27].

Охолодження вакуумним способом

Останнім часом вакуумний спосіб охолодження хлібобулочних виробів набув широкого поширення. Вакуумне охолодження – це спосіб охолодження, який базується на зниженні температури кипіння води через зменшення тиску, внаслідок чого відбувається охолодження продукту. [89].

Вакуумне охолодження є інноваційним та ефективним способом охолодження харчових продуктів. Цей процес відбувається через адіабатне кипіння вологи, що міститься в продукті, що призводить до зниження температури готового виробу завдяки зниженню тиску [42]. Основними вимогами до виробів, що охолоджуються вакуумним способом, є вологість, яка забезпечує випаровування та охолодження, а також необхідна пористість (газова проникність), яка дозволяє ефективно здійснювати процес випаровування вологи з продукту. [71].

Вакуумний охолоджувач хлібобулочних виробів — це установка, яка дозволяє охолодити хліб за 3...5 хвилин. Апарат складається з робочої вакуумної камери, в якій

за допомогою вакуумного насоса створюється розрідження, що призводить до охолодження продукту за рахунок адіабатного кипіння вологи, що міститься у ньому. [69].

Таким чином, протягом 3 хвилин температура виробу знижується з 98...100 °С до 30...35 °С. Одночасно з виробу видаляються надлишки вільної вологи, що сприяє подовженню терміну його придатності [79]. Охолоджений вакуумним способом хліб має рівномірну хрустку скоринку, на якій не з'являються тріщини, як це буває при класичному охолодженні. Крім того, збільшується об'єм і пористість виробу. Після вакуумного охолодження хліб можна одразу пакувати, нарізати, продавати або споживати [18].

Яскравим представником існуючого обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів є вакуум-охолоджувач Revent VC200W (рис. 1.6)



Рис. 1.6. Камера для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів - Revent VC200W

Вакуумний спосіб охолодження хлібобулочних виробів наразі не реалізований в умовах потокового виробництва у зв'язку з чим виникає необхідність в проведенні досліджень з метою розробки обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва [46].

1.4 Основні методологічні засади проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва

Проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва базується на комплексному підході, що включає аналіз технологічних вимог, розробці математичної моделі процесу, розробці конструкції обладнання, оптимізацію процесу, забезпеченні енергоефективності, а також врахування екологічних та гігієнічних стандартів [92].

Основні методологічні засади можна розділити на наступні пункти:

1. Аналіз технологічних вимог:

Процес проектування починається з визначення основних вимог до обладнання, що забезпечують оптимальні умови охолодження хлібобулочних виробів. Важливими параметрами є:

- Температурний режим. Необхідність досягнення швидкого охолодження при збереженні необхідної вологості і якості продукту [79].
- Час охолодження. Мінімізація часу охолодження для підвищення продуктивності без погіршення якості продукції [79].
- Вимоги до структури хлібобулочних виробів. Врахування таких факторів, як маса, геометричні параметри, газова проникність скоринки та м'якушки хліба, структурно-механічних властивості м'якушки, які впливають на режимні параметри процесу [79].

2. Розробка математичної моделі процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату:

Розробка математичної моделі процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів є основою для визначення режимних параметрів процесу [43]. Модель повинна включати:

- Теплопередачу та масообмін. Розрахунок теплових потоків, що виникають при випаровуванні вологи з хлібобулочних виробів, а також масообміну між внутрішнім середовищем виробу та середовищем вакуумної камери [43].
- Газова проникність продукту. Визначення газової проникності скоринки та м'якушки, що безпосередньо впливає на швидкість проведення процесу [43].

- Вплив на структурно-механічні властивості. Визначення зміни в структурі м'якушки, в наслідок охолодження [43].

3. Інтенсифікація процесу вакуумного охолодження:

Для досягнення ефективності процесу необхідно інтенсифікувати режимні параметри:

- Час охолодження. Пошук балансу між швидкістю охолодження і якістю готової продукції [98].
- Швидкість зниження тиску. Забезпечення стабільного і контрольованого зниження тиску для запобігання руйнування виробів [98].

4. Проектування конструкції апарату:

Конструкція апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів повинна бути розроблена таким чином щоб забезпечити ефективне охолодження, збереження цілісності виробів та високий рівень механізації [29]. Основні аспекти:

- Тип вакуумної камери. Визначення форми, розмірів та забезпечення герметичності вакуумної камери для досягнення необхідного рівня розрідження [8].
- Система подачі та транспортування продукції. Розробка механізмів, що забезпечують рівномірне та безпечне переміщення хлібобулочних виробів до камери вакуумування, та вивантаження охолодженої продукції [11].

Таким чином методологічний підхід до проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва сприяє створенню ефективних, безпечних і економічних технологій, які дадуть змогу знизити собівартість готових виробів та покращити їхню якість.

1.5 Висновки до розділу та постановка задач досліджень

Висновки:

1. Природний (конвективний) спосіб охолодження, має ряд недоліків. Характеризується значною тривалістю процесу, вимагає великих виробничих площ і супроводжуються бактеріальним забрудненням поверхні виробів і початком процесу черствіння.

2. Застосування спіральних охолоджувачів при природному способі охолодження дозволяє механізувати процес і зменшити необхідні виробничі площі, але не забезпечує істотного скорочення тривалості охолодження, та зниження ризику бактеріального забруднення.
3. Охолодження кондиціонованим повітрям дозволяє досягти більшої інтенсивності процесу за рахунок рециркуляції охолодженого і зволоженого повітря, що забезпечує стабільність температури та вологості робочого повітря.
4. Використання спіральних і колискових охолоджувачів з кондиціонованим повітрям дозволяє підвищити ефективність і механізувати процес, але цей спосіб має обмеження в досягненні максимальної продуктивності.
5. Найбільш перспективним для інтенсифікації процесу охолодження є впровадження вакуумного способу охолодження. Дозволяє значно скоротити час охолодження до декількох хвилин за рахунок адіабатного кипіння вологи, що забезпечує високу якість готової продукції, збільшує термін її зберігання, створює рівномірну хрустку скоринку та можливість проводити нарізання та пакування.
6. Реалізація вакуумного охолодження в умовах потокового виробництва є невирішеною проблемою, що породжує необхідність подальших досліджень і розробок спеціалізованого обладнання.

Задачі досліджень:

1. Визначити вплив процесу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів;
2. Розробити методики та лабораторні установки для виконання досліджень впливу процесу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів;
3. Розробити математичну модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату яка враховуватиме вплив процесу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів, та дасть змогу розраховувати режимні параметри процесу вакуумного охолодження;
4. Розробити конструкцію апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва на основі розрахунково-дослідних даних

та сформулювати рекомендації щодо параметрів проведення процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батона;

5. Провести дослідження на міцність та деформацію найбільш навантажених конструктивних елементів апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

2.1 Експериментальні установки та методики проведення досліджень для обґрунтування параметрів апарату для вакуумного охолодження

Будова, принцип роботи та методика проведення досліджень на вакуумній експериментальній установці

Для дослідження процесу вакуумного охолодження хліба нами була розроблена та використана вакуумна експериментальна установка (рис. 2.1).

Дослідження на вакуумній експериментальній установці проводились з метою визначення основних параметрів процесу вакуумного охолодження, що впливають на якісні показники хлібобулочних виробів. У дослідженнях вивчався вплив розрідження у вакуумній камері на температуру та час охолодження батона вагою 0,5 кг.. Особливу увагу приділено аналізу динаміки зниження температури в різних шарах виробу, що дозволяє оцінити ефективність процесу та забезпечити рівномірне охолодження без виникнення внутрішніх дефектів [102].

Одним із важливих аспектів було визначення залежності втрати маси батона від глибини розрідження у вакуумній камері. Цей параметр дозволяє оцінити втрати вологи, які відбуваються внаслідок випаровування при вакуумному охолодженні та їх вплив на кінцеву якість продукту. Отримані дані дають змогу визначити оптимальну глибину розрідження, яка забезпечує мінімальну втрату маси при збереженні бажаної текстури та свіжості продукту [39].

Також досліджували вплив швидкості зниження тиску (швидкості вакуумування) на зміни геометричних параметрів батону, таких як довжина, ширина та висота. Швидке зниження тиску може викликати значний градієнт тиску між внутрішньою пористою структурою хлібобулочного виробу і зовнішнім середовищем, що може призвести до деформації, руйнування скоринки та м'якушки виробу [118]. Дослідження цих залежностей допомагає визначити режимні параметри вакуумного охолодження, що забезпечують збереження якості виробу.

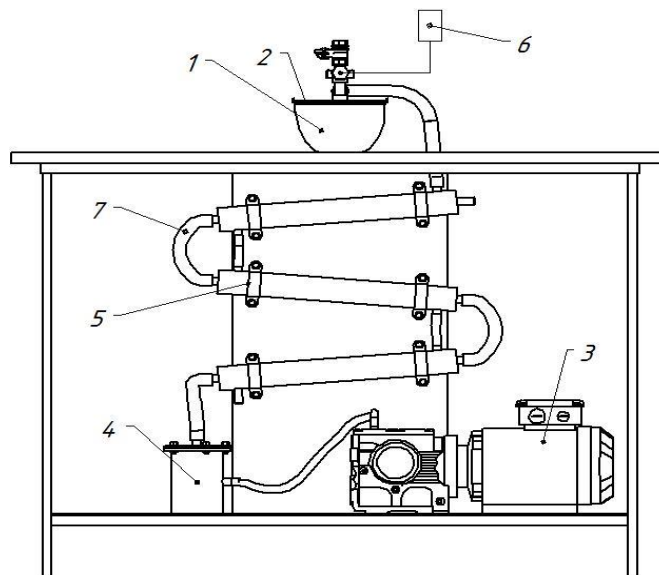


Рис. 2.1. Вакуумна експериментальна установка:

**1 – вакуумна камера; 2 – кришка вакуумної камери; 3 – вакуумний насос;
4 – конденсатозбірник; 5 – конденсатор; 6 – манометр; 7 – трубопровід**

Крім того, експериментальними дослідженнями було визначено вплив тривалості перебування в умовах розрідження на структурно-механічні властивості батона, такі як пружність, м'якість м'якушки та хрусткість скоринки. Результати досліджень послужили основою для розробки рекомендацій щодо вибору режимних параметрів вакуумного охолодження для забезпечення максимальної ефективності процесу та високої якості готової продукції.

Таким чином, використання вакуумної експериментальної установки дає змогу комплексно оцінити процес вакуумного охолодження та визначити його ключові параметри, що впливають на якісні показники хлібобулочних виробів [55].

Принцип роботи та методика проведення досліджень на вакуумній експериментальній установці (рис 2.1):

Свіжовипечений батон (при температурі 98...100 °С) після попереднього вимірювання маси, температури в центрі виробу та геометричних розмірів поміщають у вакуумну камеру 1. Камеру герметично закривають кришкою 2, після чого вмикають вакуумний насос 3. У процесі вакуумування здійснюється фіксація змін часу та тиску у вакуумній камері для контролю динаміки процесу [114].

Під час роботи вакуумного насоса пароповітряна суміш, що утворюється у вакуумній камері, відкачується і надходить у конденсатор 5. Протитечією відносно

руху пари в конденсаторі подається холодна вода, що забезпечує ефективне охолодження та конденсацію значної частини пари, що утворюється в результаті випаровування вологи з виробу [21]. Конденсована волога стікає в конденсатозбірник 4, що дозволяє знизити навантаження на вакуумний насос і зберегти стабільність процесу.

Після досягнення необхідного розрідження вимикається вакуумний насос 3, а тиск у вакуумній камері поступово вирівнюється до атмосферного за допомогою спеціального крана, розташованого на кришці 2. Це дозволяє уникнути різких перепадів тиску, які можуть призвести до деформації виробу [79].

Після завершення процесу вакуумування проводяться повторні вимірювання температури в центрі виробу, його маси та геометричних розмірів. Ці дані дозволяють оцінити ефективність вакуумного охолодження, зокрема, втрату маси, рівномірність зниження температури та вплив процесу на якісні показники виробу [60].

Використання такої методики забезпечує точне керування всіма етапами вакуумного охолодження, сприяючи отриманню достовірних даних для аналізу та оптимізації процесу.

Будова, принцип роботи та методика проведення досліджень на установці для визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона

Вакуумне охолодження хлібобулочних виробів здійснюється шляхом відведення теплоти завдяки випаровуванню вологи з продукту. Мінімальна температура, до якої може бути охолоджений виріб, залежить від вмісту в ньому вільної вологи [5].

Враховуючи, що занадто інтенсивне зниження тиску призводить до перепаду між тиском пари всередині виробу та тиском у вакуумній камері, це може спричинити механічне руйнування структури виробу [34], було визначено що основною перешкодою для виходу випаровуваної вологи є скоринка виробу. У зв'язку з цим було здійснено дослідження газової проникності скоринки та м'якушки хліба.

Газова проникність (питома пропускна здатність) - це показник об'єму газу, що проходить через одиницю поверхні за одиницю часу [92].

Для визначення газової проникності скоринки та м'якушки хлібобулочних виробів на прикладі батона нами було розроблено методику проведення досліджень та експериментальну установку (рис. 2.2).

Принцип роботи та методика проведення досліджень на установці для визначення газової проникності скоринки та м'якушки хлібобулочних виробів (рис. 2.2):

Для проведення експериментальних досліджень газової проникності скоринки та м'якушки батона за допомогою ножа вирізається зразок у вигляді диска діаметром 25 мм і товщиною 5 мм. Зразок може бути отриманий як зі свіжоспеченого батона, так і з попередньо охолодженого. Перед початком експерименту його зважують, щоб зафіксувати початкову вагу, а потім поміщають в затискач 3, який забезпечує герметичність.

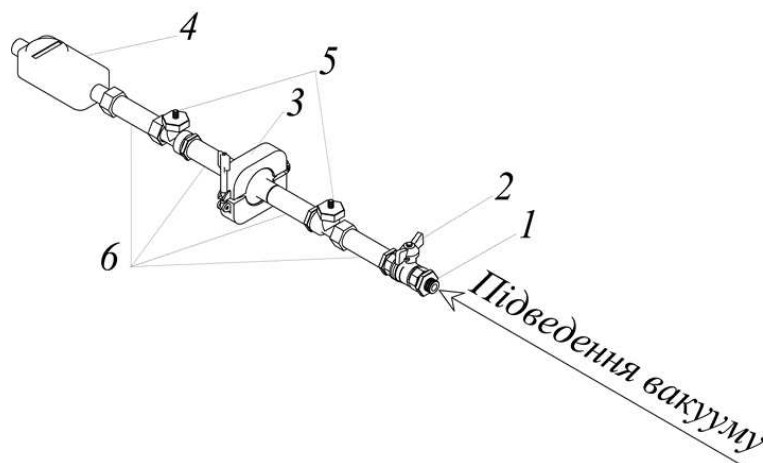


Рис. 2.2. Установка для визначення газової проникності скоринки та м'якушки хлібобулочних виробів:

- 1 – штуцер для приєднання вакуумного насосу; 2 – кран для регулювання швидкості створення вакууму; 3 – затискач; 4 – лічильник витрат газу;**
5 – трійники з штуцерами для диференційного під'єднання манометра;
6 –трубопровід

Далі вмикається вакуумний насос для створення розрідження в системі. Під час експерименту швидкість потоку повітря фіксується за допомогою лічильника витрат газу 4. Одночасно в режимі реального часу фіксується зміна тиску в системі за

допомогою цифрового манометра, під'єданого до трійників зі штуцерами, що забезпечують диференціальне підключення манометра 5 [92].

Важливим етапом є документування процесу за допомогою відеозйомки. Це дозволяє проаналізувати динаміку зміни швидкості потоку газу і тиску в часі, а також визначити стабільність роботи установки і поведінку зразка під впливом розрідження.

Після завершення випробування зразок виймають із затискача, знову зважують і порівнюють результати з вихідними даними. Це дає можливість оцінити зміни маси зразка внаслідок втрати вологи і зробити висновки про газову проникність скоринки або м'якушки батона при вакуумному охолодженні [92].

Газову проникність скоринки та м'якушки батона визначаємо за кількістю газу, що проходить через одиницю поверхні скоринки або м'якушки за одиницю часу [89]:

$$\Pi = V/(\tau F), \quad (\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})).$$

де: V – об'єм газу, що пройшов через скоринку, м^3 ;

τ – час, за який об'єм газу пройшов через скоринку, с ;

F – площа скоринки, м^2

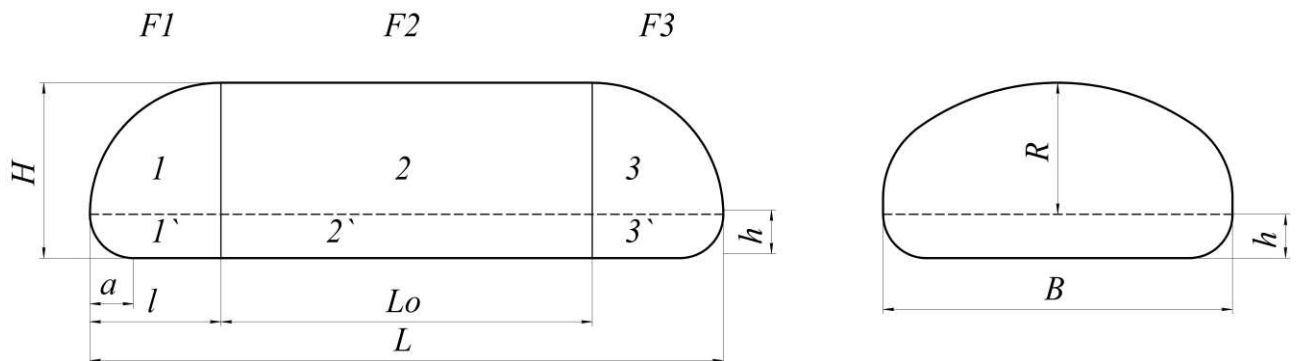


Рис. 2.3. Схема поділу батону на частини:

F1, F3 - тіла обертання; F2 – циліндрична частина батону; H – висота батона; B – ширина батона; L – довжина батона; L₀ – довжина циліндричної частини батона; l – радіус тіл обертання; R – висота що відділяє верхню частину скоринки від нижньої; a, h – розміри скруглення нижньої кромки батону що відділяє верхню скоринку від нижньої.

Для визначення об'єму газу, який проходить через скоринку батону розраховуємо площу поверхні батону [29].

Найбільш поширеними формами хлібобулочних виробів є: циліндр — для виробів типу багета; паралелепіпед — для формових хлібин; тіла обертання — для подового хліба та булочок [127].

Щоб визначити площу поверхні батона масою 0,5 кг, його умовно поділяють на окремі геометричні частини (схематичне зображення поділу представлено на рис. 2.3).

Розбиваємо батон на верхню скоринку висотою

$$R = \frac{B}{2} \quad (1)$$

та нижню частину висотою

$$h = H - R \quad (2)$$

По довжині верхню скоринку розбиваємо на три частини

$$l_{1,3} = R \quad (3)$$

Довжина циліндра

$$L_0 = L - 2R \quad (4)$$

Поверхня $\frac{1}{2}$ циліндра

$$F_2 = \pi R L_0 \quad (5)$$

Поверхня F_1 і F_3 – поверхні обертання навколо $l = R$

Під час порівняння розрахованої площі поверхні круглого подового виробу, визначеної за запропонованою формулою, з площею поверхні кулі того ж об'єму, нами було отримано коефіцієнт, що враховує співвідношення діаметра виробу d до його висоти h . $d=H$; $h=R$ [127].

$$n = 0.15 \frac{d}{h} + 0.7 \quad (6)$$

де: n - коефіцієнт, що враховує відношення діаметра виробу до його висоти;

d - діаметр виробу;

h – висота виробу.

Таким чином, наближений вираз для розрахунку площі поверхні тіла обертання, що моделює форму круглого подового хліба, матиме такий вигляд:

$$F_{1.3} = \frac{4\pi R^2}{2} \quad (7)$$

де $R=l$

Площа F_2' (середня під циліндром)

$$F_2' = (H - R) \cdot L_0 \quad (8)$$

Поверхні F_1' і F_3' (бокові півкола)

$$F_{1,3}' = \pi R(H - R) \quad (9)$$

$$\text{разом } F = 2\pi R(H - R) \quad (10)$$

Поверхня нижньої скоринки (центральна)

$$F_{\text{под.}}^2 = L_0 \cdot (B - 2a) \quad (11)$$

Нижні поверхні $F_{\text{под.}}^{1,3}$

$$F_{\text{под.}}^{1,3} = F_{\text{под.}}' = 0.5\pi\left(\frac{B-2a}{2}\right) \quad (12)$$

$$\text{разом } F_{\text{под.}}^1 + F_{\text{под.}}^2 = 2F_{\text{под.}}' \quad (13)$$

$$F_{\text{под.}}^{1,3} = \pi\left(\frac{B-2a}{2}\right)^2 \quad (14)$$

Площа верхньої скоринки батону

$$F_{\text{верх}} = F_2 + F_1 + F_3 + F_2' + F_1' + F_3' \quad (15)$$

Поверхня нижньої скоринки

$$F_{\text{под}} = F_{\text{под}}^2 + F_{\text{под}}^1 + F_{\text{под}}^3 \quad (16)$$

Загальна площа скоринки батону

$$F_{\text{заг}} = F_{\text{верх}} + F_{\text{под}} \quad (17)$$

Для визначення та розрахунку газової проникності скоринки батона враховують особливості нерівномірного прогрівання батона під час випікання. Це пов'язано зі специфікою теплопередачі: верхня, бічна і нижня поверхні скоринки під час випікання знаходяться в різних температурно-вологісних умовах [85]. З цієї причини для точності аналізу нами було умовно розділено поверхню батона на ділянки, які мають приблизно однакову площу (рис. 2.4). Такий підхід дозволяє зосередитися на локальних особливостях скоринки, що важливо для оцінки її газової проникності [92].

Кожна ділянка досліджується окремо, використовуючи зразки однакового розміру, вирізані з відповідної частини скоринки. Це дозволяє врахувати

неоднорідність стану поверхні скоринки, викликану різними тепловими умовами, такими як інтенсивність теплового випромінювання, конвекція, контакт з подом печі.

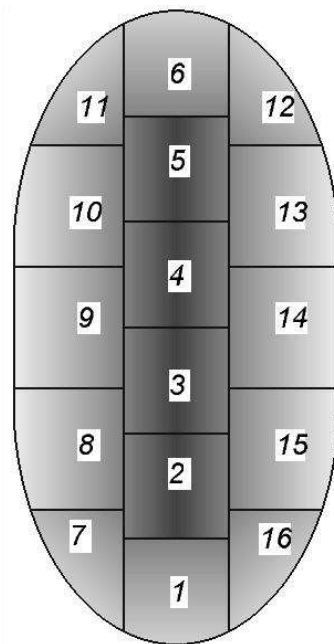


Рис. 2.4. Схема дослідження газової проникності верхньої скоринки батону:

1 – 16 – умовний поділ верхньої скоринки батону на частини для проведення досліджень газової проникності

Особлива увага приділяється нижній скоринці, яка формується при безпосередньому контакті з подом печі. Оскільки цей контакт забезпечує більш рівномірний нагрів, газову проникність нижньої скоринки можна оцінювати комплексно [85].

Результати дослідження газової проникності різних ділянок скоринки батона дають змогу визначити, які частини батона мають більшу газову проникність, а які меншу.

Будова, принцип роботи та методика проведення досліджень на напівавтоматичному пенетрометрі АП 4/1 з плоским індентором із визначення структурно-механічних властивостей м'якушки батона

Беручи до уваги, що надто швидке зниження тиску у вакуумній камері викликає градієнт між парою всередині продукту і середовищем вакуумної камери, який може призвести до руйнування заготовки, було встановлено, що скоринка продукту

виступає основним бар'єром на шляху виходу випаровуваної вологи [126]. При цьому структурно-механічні властивості м'якушки визначають допустиму величину цього градієнта. Для визначення максимально допустимого градієнта тиску, що забезпечує цілісність продукту під час вакуумного охолодження, було досліджено структурно-механічні властивості м'якушки батона [126].

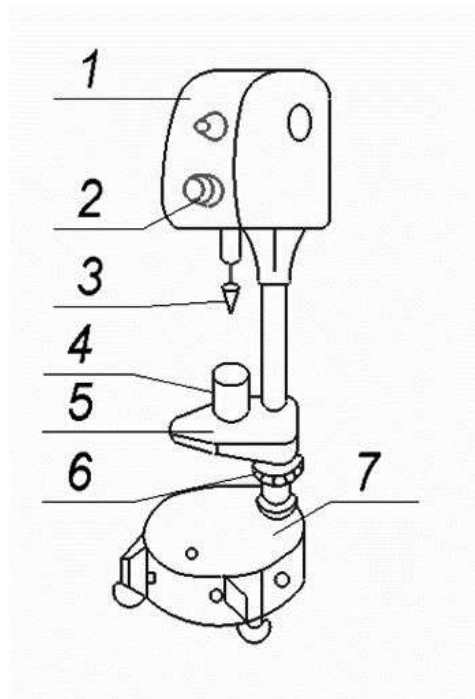


Рис. 2.5. Пенетрометр моделі АП-4/1:

**1 – вимірювальна головка; 2 – показчик шкали; 3 – індентор;
4 – зразок; 5 – платформа для зразка; 6 – гайка для підведення платформи із
зразком до індентора; 7 – основа**

Для оцінювання структурно-механічних властивостей м'якушки хліба було використано напівавтоматичний пенетрометр марки АП 4/1, оснащений плоским індентором (рис. 2.5) [15].

Методика проведення досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки за допомогою напівавтоматичного пенетрометра марки АП 4/1 з плоским індентором:

Дослідження проводились у виробничих умовах над свіжоспеченим батонем, щойно вийнятим з печі, за чітко визначеною методикою. На першому етапі з батона гострим ножом вирізали зразок м'якушки у формі куба зі сторонами 30 мм. Зразок обережно поміщали на платформу пенетрометра, яку піднімали до поверхні індентора

за допомогою гайки для підведення платформи із зразком до індентора, забезпечуючи точне позиціонування.

В ході досліджень було встановлено, що структурно-механічні характеристики м'якушки значною мірою залежать від її температури. Для забезпечення достовірності результатів і мінімізації похибок для кожного значення температури м'якушки робили по три окремі проби. Кожен зразок використовували лише один раз, щоб уникнути зміни структурно-механічних властивостей внаслідок повторного навантаження.

Проведені експерименти дозволили отримати детальні дані щодо впливу температури на структурно-механічні характеристики м'якушки, які стали основою для подальшого аналізу поведінки хлібобулочних виробів під час вакуумного охолодження.

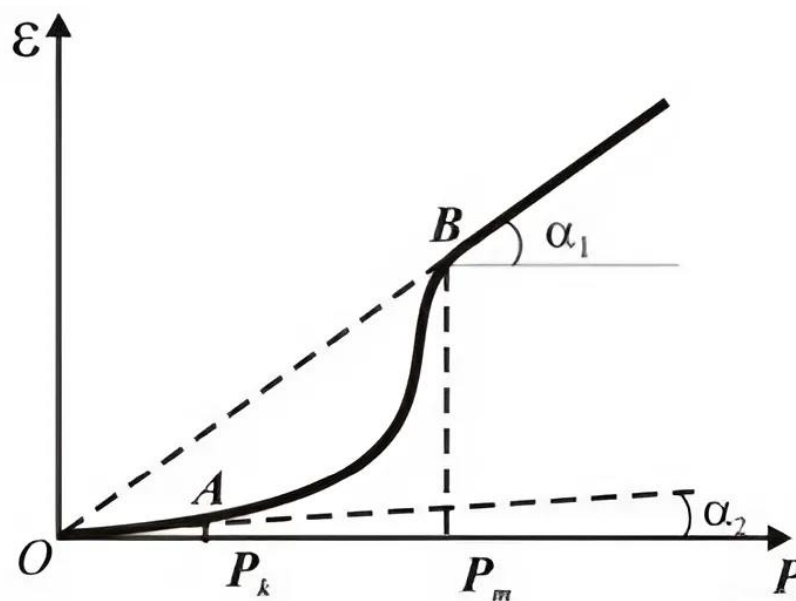


Рис. 2.6. Узагальнений графік деформування низькомодульних матеріалів під час компресійних досліджень структурно-механічних властивостей компресійним методом

Аналіз отриманих експериментальних даних базувався на фундаментальних дослідженнях П. А. Ребіндера та інших вчених, які вивчали структурно-механічні властивості низькомодульних матеріалів компресійним методом. Основною моделлю для аналізу поведінки матеріалу стала деформаційна крива, яка ілюструє залежність між прикладеним напруженням і ступенем деформації [130].

На початковому етапі дослідження, на відрізку ОА (Рис. 2.6), матеріал демонструє лінійну залежність між напруженням і деформацією, що відповідає закону Гука. Це означає, що матеріал поводить себе як пружно-пластичний матеріал, де деформація пропорційна прикладеному напруженню. Точка P_k на кривій визначає момент, коли структура матеріалу починає руйнуватися [130].

Подальше збільшення напруження переводить матеріал в фазу нелінійної поведінки, що відображається на ділянці АВ. Тут крива втрачає лінійний характер, що свідчить про часткове руйнування структури матеріалу. У цій фазі з'являються ознаки пластичної деформації, коли структурні елементи починають переміщатися один відносно одного без можливості повного відновлення [96, 130].

Точка В на кривій є критичною і відповідає моменту, коли структура системи майже повністю зруйнована. Напруга в цій точці називається граничною напругою зсуву P_m або границею міцності матеріалу. Вихід за межі цієї точки означає, що матеріал втрачає здатність зберігати свою структуру і починає деформуватися за іншою поведінковою моделлю, в якій відновлення попередньої форми вже неможливе [96].

Ці результати важливі для визначення умов, за яких м'якушка хліба може витримати вакуумне охолодження без руйнування своєї структури. Вони також дозволяють оптимізувати параметри процесу, щоб запобігти перевищенню граничної напруги зсуву під час охолодження.

2.2 Методика дослідження міцності та деформації конструктивних елементів апарату за допомогою імітаційного моделювання

При розробці обладнання необхідно проводити перевірку найбільш навантажених конструктивних елементів. Для забезпечення безперебійної роботи обладнання для харчових виробництв виникає необхідність вибору матеріалів, які мають допуск до контакту з харчовими продуктами, забезпечують необхідну міцність, герметичність і не впливають на якість кінцевого продукту. Крім того, необхідно провести випробування цих елементів на міцність і деформацію, щоб забезпечити їх надійність в умовах експлуатації [1].

Для точного аналізу міцності та деформації конструктивних елементів апарату для вакуумного охолодження було проведено чисельне моделювання з використанням програмного середовища SOLIDWORKS Simulation, яке дозволяє детально дослідити механічну поведінку конструкцій під дією різних навантажень. Це середовище використовує метод скінченних елементів (МСЕ) для чисельного розв'язання задач, пов'язаних з міцністю, деформацією, тепловими та іншими фізичними процесами, що відбуваються в матеріалах [1, 3].

Методика дослідження конструктивних елементів апарату для вакуумного охолодження на міцність та деформацію за допомогою середовища SOLIDWORKS Simulation [1]:

1. Створення 3D-моделей конструктивних елементів

Першим кроком є створення тривимірних моделей конструктивних елементів апарату для вакуумного охолодження. Всі компоненти проектуються відповідно до реальних розмірів і конфігурацій. Важливим аспектом є точне моделювання геометрії кожного елемента. Для цього ми використовуємо доступні інструменти SOLIDWORKS для точного відтворення компонентів конструкції. Моделі повинні точно відображати реальні розміри та матеріали, що дозволяє застосовувати ефективні методи аналізу та оцінки міцності [1, 3].

2. Вибір матеріалів та фізичних властивостей

Для кожного досліджуваного конструктивного елемента визначаються відповідні матеріали, що використовуються в реальній конструкції апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва. Необхідно враховувати всі необхідні фізичні характеристики матеріалів, такі як модуль пружності, межа міцності, коефіцієнт теплового розширення, коефіцієнт в'язкості та інші, які важливі для коректного моделювання поведінки матеріалу під навантаженням. Цей етап дозволяє забезпечити точність розрахунків поведінки різних матеріалів під дією навантаження [1].

3. Визначення навантажень і граничних умов

Для коректного моделювання важливо визначити фактичні навантаження, що діють на конструктивний елемент. Для цього в SOLIDWORKS Simulation були

використані різні типи навантажень, такі як розподілений тиск та зосереджені сили. Граничні умови також визначалися з урахуванням фактичних контактів між елементами конструкції [1].

4. Запуск симуляції

Після виконання попередніх кроків запускаємо симуляцію, під час якої модель піддається навантаженню відповідно до заданих умов. SOLIDWORKS Simulation використовує метод скінченних елементів для розподілу навантажень по всіх елементах моделі і розрахунку їх впливу на міцність, деформацію. Під час моделювання виконується покроковий аналіз зміни напружень і деформацій в різних точках вузла, що дозволяє виявити критичні зони, які можуть призвести до пошкоджень або несправностей в роботі вузла вакуумування [1].

5. Аналіз результатів моделювання

Після проведення моделювання отримані результати, дозволяють детально проаналізувати напруження та деформації. Розподіл напружень в усіх частинах конструктивного елемента що дозволяє виявити зони з найбільшими напруженнями, які можуть спричинити механічні пошкодження або передчасне зношування матеріалів [1].

Особлива увага приділяється виявленню так званих «гарячих точок» - ділянок, де найбільше напруження. Це дозволяє визначити можливі місця для посилення конструкції або зміни матеріалів для підвищення її надійності.

6. Оптимізація конструкції

На основі аналізу результатів моделювання вносяться необхідні зміни. Це включає зміну геометрії елементів, посилення певних частин конструкції. Оптимізація конструкції дозволяє досягти балансу між міцністю, вагою і витратою матеріалів, що є важливим аспектом при розробці обладнання [1].

2.3 Висновки до розділу

У розділі представлено експериментальні та імітаційні методи дослідження, що дозволили визначити параметри процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів.

1. Розроблено вакуумну експериментальну установку, яка дала змогу дослідити вплив глибини розрідження, швидкості створення розрідження та тривалості перебування у вакуумі на температуру, втрату маси, геометричні параметри, а також структурно-механічні властивості батона.

2. Розроблено методику визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона, що дозволяє оцінити роль скоринки як бар'єра для випаровуваної вологи. Було встановлено, що газова проникність неоднорідна по поверхні батона, що зумовлено різними умовами теплопередачі під час випікання.

3. Розроблено методику проведення дослідження з використанням напівавтоматичного пенетрометра для визначення структурно-механічних властивостей м'якушки, зокрема для встановлення граничних напружень, які можуть викликати руйнування структури під час вакуумного охолодження.

4. На основі літературних джерел сформовано методику проведення імітаційного моделювання конструктивних елементів апарату у середовищі SOLIDWORKS Simulation, з метою аналізу напружено-деформованого стану елементів вакуумної системи, виявлення потенційно небезпечних зон та здійснення конструктивної оптимізації.

Загалом, застосовані експериментальні та чисельні методи дослідження забезпечили комплексне обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ У ВАКУУМНІЙ КАМЕРІ АПАРАТУ

3.1 Фізико-механічні властивості батона

Результати досліджень на вакуумній експериментальній установці

Використання запропонованого способу охолодження подових хлібобулочних виробів потребує проведення досліджень для встановлення режимних параметрів процесу. Це пояснюється тим, що занадто інтенсивне зниження тиску викликає виникнення градієнта тиску між внутрішнім середовищем виробу та середовищем вакуумної камери, що може призвести до його руйнування [38].

Для дослідження основних параметрів вакуумного способу охолодження хлібобулочних виробів розроблено вакуумну експериментальну установку.

Для визначення втрати вологи використовувалися ваги, а для вимірювання початкової та кінцевої температури виробів – мультиметр з термопарою. Під час дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів контролювалися такі параметри: глибина розрідження у вакуумній камері (кПа), початкова та кінцева маса (г), час проведення дослідів (с), початкова та кінцева температура (°C).

Охолодження хлібобулочних виробів є важливим технологічним процесом, під час якого хліб досягає таких фізико-механічних показників, які забезпечують якісне виконання процесів його нарізання та пакування. Рекомендована температура хлібобулочних виробів для цих процесів становить 30 °C [38].

Оскільки при вакуумному способі охолодження тепло відводиться шляхом випаровування вологи з продукту, мінімальна температура, до якої можна охолодити хлібобулочний виріб, визначається кількістю вільної вологи в ньому [72].

Оскільки надмірна втрата вологи виробом є неприпустимою, було досліджено вплив кінцевого тиску середовища вакуумної камери експериментальної установки на кількість вологи, що випаровується.

За результатами проведених досліджень було встановлено, що створення розрідження у вакуумній камері до -4 кПа призводить до зниження вологості продуктів на рівень $5...6\%$, що відповідає вимогам рецептури, яка становить $24,0 \pm 1\%$ [59]. При традиційному способі охолодження досягнення такої вологості та температури готового продукту займає від 1,5 до 2 годин (залежно від температури навколишнього середовища). За цей час також досягається необхідна температура для подальшої обробки виробів, яка складає $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [72].

Необґрунтовано створювати розрідження в вакуумній камері нижче -4 кПа, оскільки це може спричинити переохолодження виробів та надмірну втрату вологи.

При вивченні режимних параметрів процесу вакуумного охолодження батона масою $0,5$ кг встановлено, що скоринка, яка утворюється при випіканні має значний опір і перешкоджає виходу пари з середини виробу в навколишнє середовище. Цей бар'єр, що утворюється на поверхні хлібобулочних виробів, значно знижує ефективність процесу вакуумного охолодження, оскільки випарувана волога не може вільно виходити з внутрішніх шарів заготовки. У цьому випадку інтенсивність охолодження буде обмежена не тільки газовою проникністю скоринки, а й міцнісними характеристиками м'якушки виробу [102].

Якщо тиск всередині заготовки значно перевищує тиск середовища вакуумної камери, виникають напруги, які призводять до деформації виробу та його руйнування (рис. 2.7, 2.8) [102]. Як видно з зразків № 2 і 3 (рис. 2.8), через надмірно інтенсивне зниження тиску у вакуумній камері утворюється перепад тиску між парою всередині виробу та середовищем вакуумної камери. Це викликає руйнування заготовки, що проявляється, зокрема, у відриві м'якушки від нижньої скоринки (Рис. 3.2) та розтріскуванням скоринки (Рис. 3.1).



Рис. 3.1. Розтріскування скоринки батону в результаті занадто інтенсивного зниження тиску в вакуумній камері



Рис. 3.2. Руйнування подового хліба (Батона):

1 – зразок при максимальній швидкості створення розрідження у вакуумній камері 4,5 кПа/с при якому не відбувається руйнування;

2, 3 – зразки при максимальній швидкості створення розрідження у вакуумній камері 5,5 кПа/с (2) та 8,8 кПа/с (3), при яких відбувається руйнування

Також на дослідній установці було встановлено режим охолодження батона до температури 30 °С при якому не відбувається руйнування, і який представлено на рис. 3.3, крива 1. Криві 2 і 3 на рис. 3.3 відповідають зразкам 2 і 3 на рис. 3.2, і за таких режимів виявлено, що м'якушка досліджуваного зразка розривається, що не відповідає встановленим вимогам якості.

За режиму, представленого кривою 1 на рис. 3.3, охолодження батона масою 0,5 кг триває 2 хвилини, а максимальна швидкість розрідження становить не більше 4,5

кПа/с. При більш інтенсивному зниженні тиску (як на кривих 2 і 3) спостерігається порушення цілісності м'якушки, що свідчить про необхідність ретельного контролю швидкості охолодження для забезпечення високої якості кінцевого продукту.

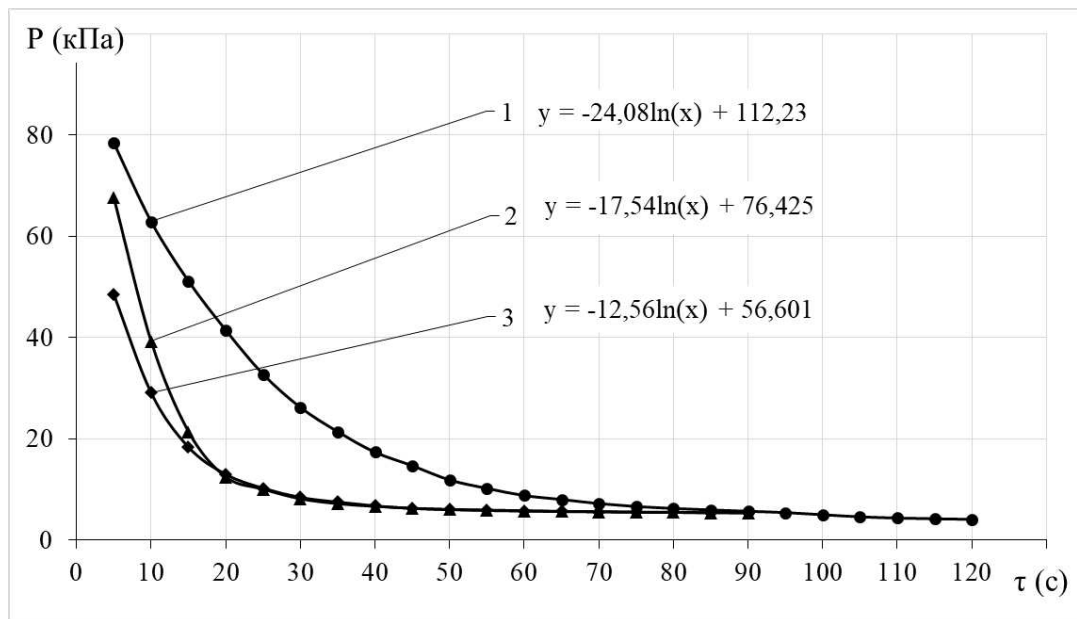


Рис. 3.3. Криві створення розрідження в вакуумній камері:

1 – режим вакуумного охолодження при якому не відбувається руйнування бетону а максимальна швидкість створення розрідження у вакуумній камері складає 4,5 кПа/с; 2,3 – режими при яких відбувається руйнування бетону а максимальна швидкість створення розрідження у вакуумній камері складає 5,5 кПа/с (2) та 8,8 кПа/с (3)

З метою оптимізації режимних параметрів процесу вакуумного охолодження бетону (рис. 3.3. крива 1) нами було проведено дослідження з визначення газової проникності скоринки та м'якушки бетону, а також дослідження структурно-механічних властивостей м'якушки.

Результати досліджень з визначення газової проникності скоринки та м'якушки бетона

Після проведених розрахунків визначено, що зальна площа скоринки бетона складає 0,091 м². Розрахунки площі скоринки бетона проводилися над 30 зразками за допомогою програми Microsoft Excel, таблиця з проведеними розрахунками представлена в додатку 1 таблиця 1.

У результаті проведених досліджень за різних умов охолодження випеченого батона у вакуумній експериментальній установці встановлено, що швидкість зміни тиску у вакуумній камері впливає не тільки на тривалість охолодження, але й на якість готових виробів. При занадто інтенсивному зниженні тиску у вакуумній камері відбувається руйнування батона, що проявляється у відриві м'якушки батона від нижньої скоринки і розтріскуванні скоринки. Це пов'язано з виникненням надмірного градієнта тиску між парою, що утворюється в середині батона під час охолодження, і середовищем у вакуумній камері. Такий градієнт виникає внаслідок низької газової проникності скоринки.

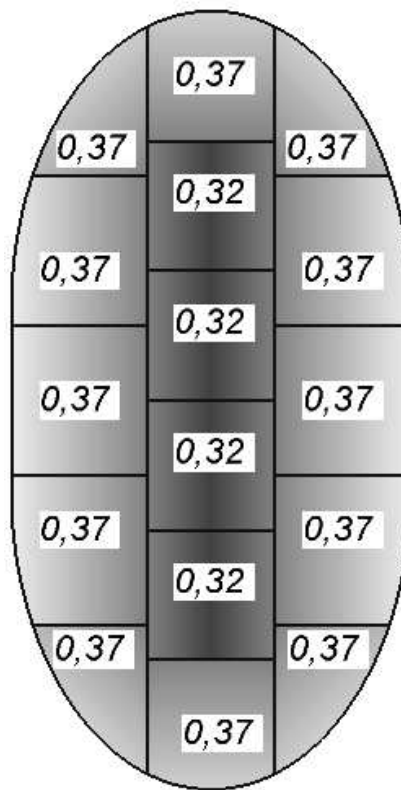


Рис. 3.4. Розподіл величини газової проникності верхньої скоринки батона
($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$)

Інтенсивність охолодження обмежуються газовою проникністю скоринки та міцнісними властивостями м'якушки. За нашими спостереженнями, для батона максимальна швидкість вакуумування не повинна перевищувати 4,5 кПа/с. Це забезпечує цілісність батона, зокрема уникнення дефектів, пов'язаних з розтріскуванням скоринки та відривом м'якушки, і дозволяє отримати необхідну

якість готового продукту. Таким чином, контроль швидкості зміни тиску є ключовим фактором забезпечення ефективного охолодження та високої якості продукції.

За результатами проведених досліджень встановлено, що газова проникність центральної частини скоринки батона (ділянки 2-5; рис. 2.4) значно нижча, ніж газова проникність бічних ділянок скоринки (рис. 3.4). Це пояснюється тим, що під час випічки центральна частина виробу піддається більш інтенсивному термічному впливу, що призводить до ущільнення його структури і зниження газової проникності.

Візуально зміни газової проникності скоринки можна визначити за кольором: чим темніше колір скоринки, тим нижче її газова проникність. Більш темні ділянки скоринки мають більш щільну структуру за рахунок більш інтенсивних процесів карамелізації та поверхневого випаровування вологи, які створюють перешкоду для дифузії водяної пари. Навпаки, більш світлі ділянки бічної частини скоринки зберігають більш високу газову проникність через менший термічний вплив і більш пористу структуру.

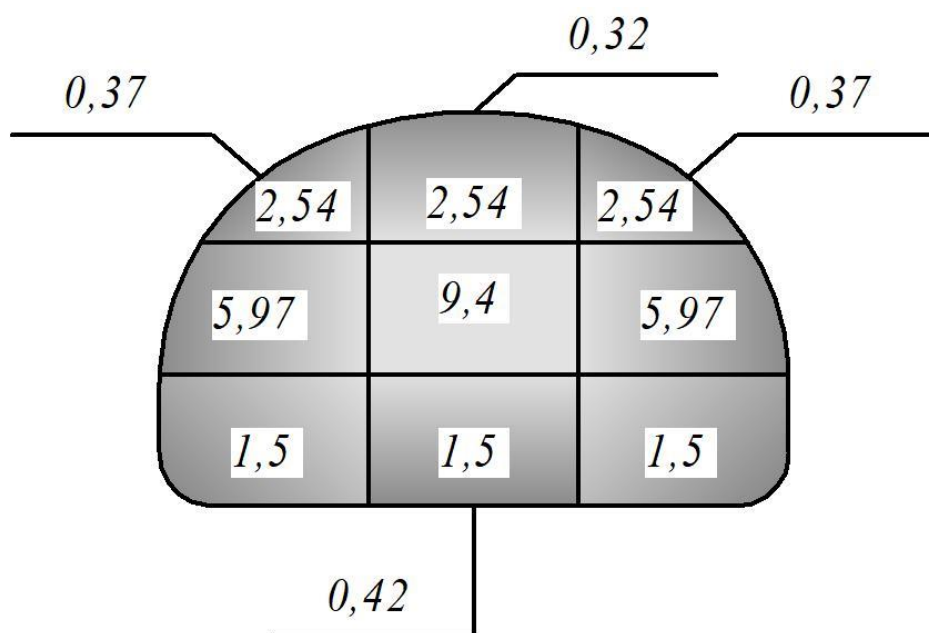


Рис. 3.5. Розподіл величини газової проникності м'якушки в поперечному розрізі батону ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$)

Ці особливості розподілу газової проникності скоринки важливі для забезпечення рівномірного охолодження батона. Центральна частина скоринки з

нижчою газовою проникністю може створювати додаткові напруги всередині продукту під час вакуумного охолодження, збільшуючи ризик пошкодження.

Під час досліджень встановлено, що газова проникність м'якушки в поперечному перерізі батона (рис. 3.5) значно перевищує газову проникність скоринки. Це дозволяє стверджувати, що газова проникність м'якушки практично не впливає на процес вакуумного охолодження батона, оскільки обмеження газообміну між середовищами обумовлено властивостями скоринки.

За результатами проведених досліджень та розрахунків встановлено, що загальний об'єм пари, що утворюється при охолодженні батона масою 0,5 кг від 100 до 30 °С внаслідок зниження тиску від 101,325 кПа до 4 кПа дорівнює $V = 0,2 \text{ м}^3$.

Враховуючи, що газова проникність скоринки різна в залежності від її площини, для підвищення точності розрахунків площа поверхні батона була розділена на верхню і нижню частини.

Площа нижньої скоринки батону $F_{\text{ск.н.}} = 0,036 \text{ м}^2$ газова проникність нижньої скоринки батону: $G_{\text{ск.н.}} = 0,42 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$.

Площа середньої частини верхньої скоринки батону $F_{\text{ск.в.с.}} = 0,0088 \text{ м}^2$; газова проникність центральної частини верхньої скоринки батону: $G_{\text{ск.н.}} = 0,32 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$.

Площа бокової частини верхньої скоринки батону: $F_{\text{ск.в.б.}} = 0,0462 \text{ м}^2$; газова проникність бокової частини верхньої скоринки батону: $G_{\text{ск.н.}} = 0,37 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$.

Сумарна площа поверхні батону $F = 0,091 \text{ м}^2$, середнє значення газової проникності батона $G_{\text{ср.}} = 0,37 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$.

Результати досліджень на напівавтоматичному пенетрометрі АП 4/1 з плоским індентором із визначення структурно-механічних властивостей м'якушки батона

Для оптимізації процесу вакуумного охолодження батона визначали газову проникність скоринки батона, розраховували площу поверхні батона ($F = 0,091 \text{ м}^2$), а також визначили час, протягом якого пара що утворюється в процесі вакуумного охолодження ($V = 0,2 \text{ м}^3$) може проходити через скоринку батона ($\tau = 6,8 \text{ с}$).

Отримані результати досліджень свідчать про можливість інтенсифікації експериментально знайденого режиму вакуумного охолодження батона (рис. 3.3, крива 1). Іншими словами, є можливість скоротити час охолодження батона без зниження якості. Однак для розрахунку такого режиму, який дозволить якомога швидше охолодити батон без ризику пошкодження його структури, необхідно провести додаткові дослідження структурно-механічних властивостей м'якушки.

Структурно-механічні властивості м'якушки відіграють ключову роль у процесі охолодження, оскільки вони визначають здатність продукту протистояти внутрішнім напругам, що виникають від градієнта тиску під час вакуумування. Визначення таких характеристик, як границя міцності дозволить точніше оцінити критичні умови, при яких м'якушка може зазнати руйнування [117]. Це, в свою чергу, сприятиме розробці більш ефективних режимних параметрів вакуумного охолодження, які забезпечуватимуть баланс між швидкістю охолодження та збереженням якості батона.

Внаслідок проведених досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки батона отримані типові криві залежності деформації зразка від прикладеного напруження. Для цього використовувався компресійний метод, який є одним із найпоширеніших методів визначення структурно-механічних властивостей низько модульних матеріалів [96].

Криві деформації зразків обробляли наступним чином: усі точки, отримані за відповідної температури, розташовували на точкових діаграмах, на основі яких будували лінії тренду (рис. 3.6 – 3.9). За описаною методикою визначали границю міцності м'якушки батона при різних температурах.

Подальший аналіз отриманих експериментальних даних дозволив побудувати графік, що демонструє залежність границі міцності м'якушки батона від температури (рис. 3.10). Ця залежність виявила чітку закономірність: гранична міцність м'якушки батона прямо пропорційна температурі. Зокрема, зі зниженням температури границя міцності збільшується, що свідчить про підвищений ризик деформації та руйнування структури виробу на початку процесу вакуумного охолодження.

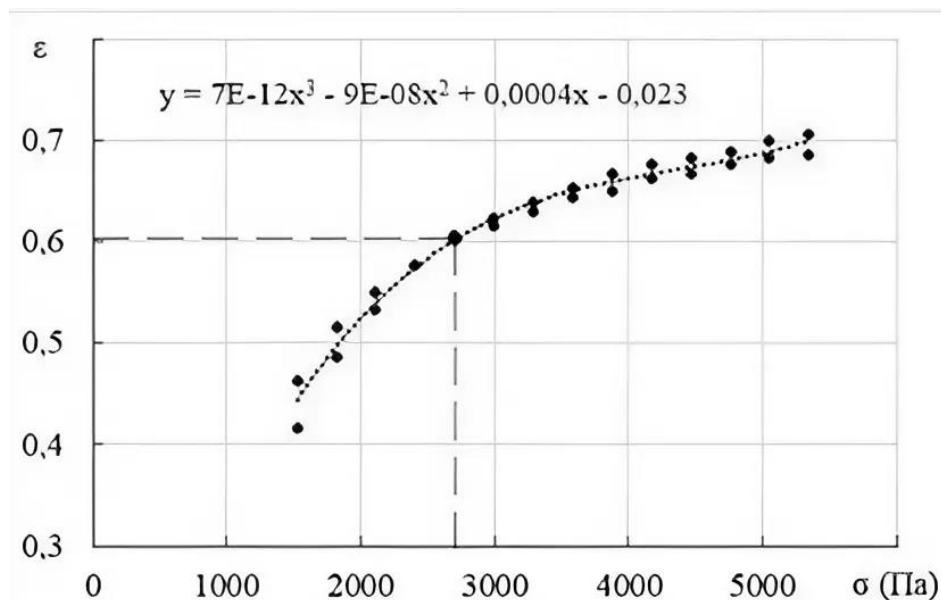


Рис. 3.6. Залежність деформації зразка від прикладеного напруження отримана в процесі аналізу результатів досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки бетону за температури зразка 60 °С, границя міцності 2700 Па

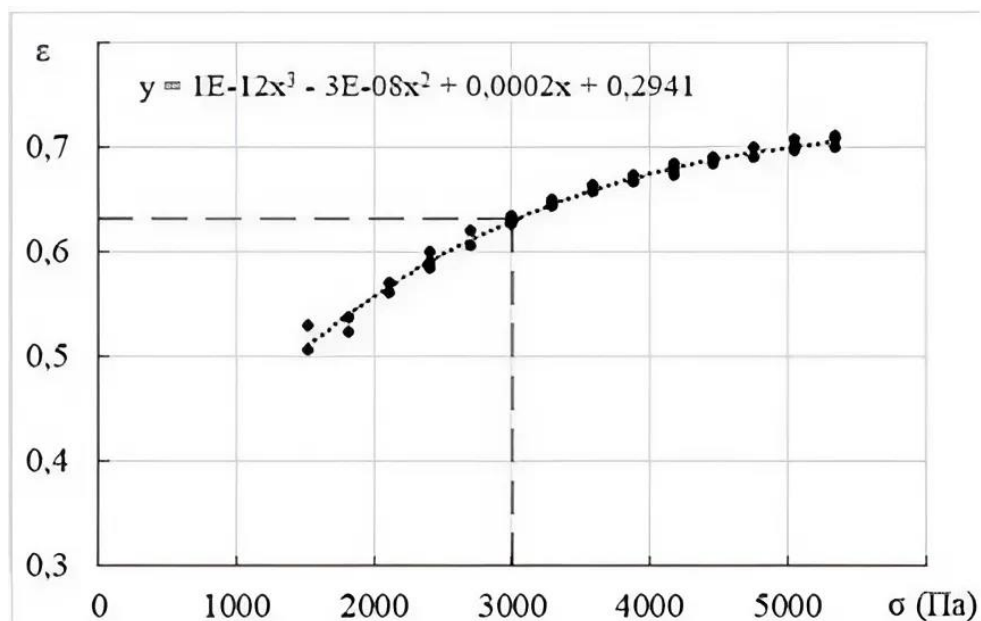


Рис. 3.7. Залежність деформації зразка від прикладеного напруження отримана в процесі аналізу результатів досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки бетону за температури зразка 50 °С, границя міцності 3000 Па

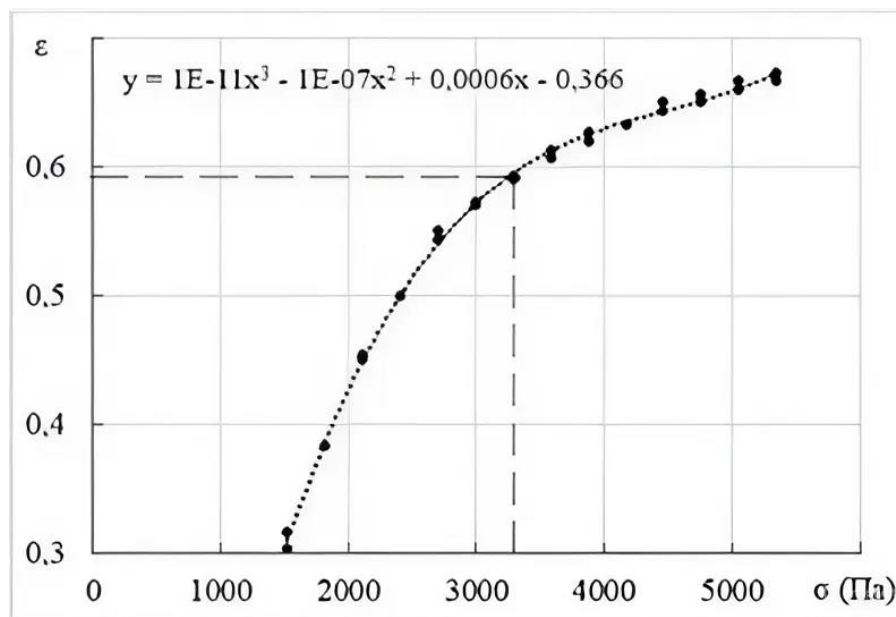


Рис. 3.8. Залежність деформації зразка від прикладеного напруження отримана в процесі аналізу результатів досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки бетону за температури зразка 40 °С, границя міцності 3300 Па

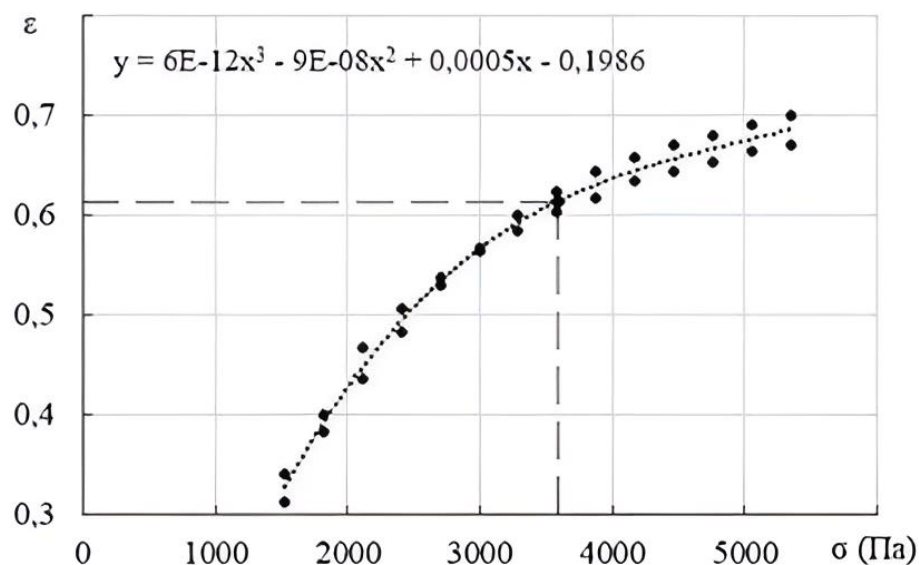


Рис. 3.9. Залежність деформації зразка від прикладеного напруження отримана в процесі аналізу результатів досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки бетону за температури зразка 30 °С, границя міцності 3600 Па

За 100 °С границя міцності складає 1500 Па, тоді як за 30 °С вона має значення 3600 Па. Ця залежність може бути виражена у вигляді рівняння:

$$\sigma = -30 \cdot t + 4500 \quad (18)$$

де: t - температура м'якушки батона ($^{\circ}\text{C}$);

σ - границя міцності м'якушки батону в (Па).

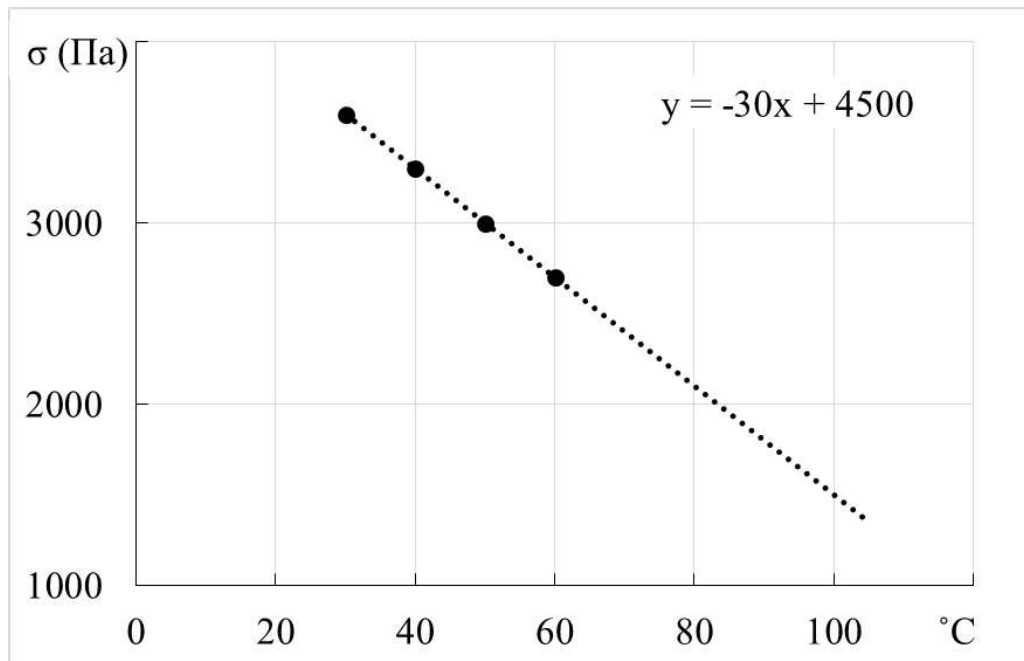


Рис. 3.10. Графік залежності границі міцності від температури

На підставі отриманих даних можна стверджувати, що процес вакуумного охолодження вимагає врахування структурно-механічних властивостей м'якушки, оскільки ці характеристики визначають здатність батона протистояти внутрішнім напругам, які виникають через градієнти тиску. Отримані результати є важливою основою для розрахунку оптимальних режимних параметрів вакуумного охолодження, які забезпечуватимуть баланс між ефективністю процесу та збереженням цілісності структури хлібобулочних виробів.

3.2 Підґрунтя для побудови математичної моделі процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату

Для розробки математичної моделі вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батона з пшеничного борошна вищого сорту масою 0,5 кг було використано комплексний підхід, що включає як огляд сучасних наукових публікацій, так і результати проведених експериментальних досліджень. Аналіз літератури дозволив сформулювати теоретичну основу, а результати експериментальних

досліджень дали емпіричні дані, необхідні для врахування конкретних параметрів процесу.

Дослідження охоплюють основні характеристики вакуумного охолодження, зокрема динаміку зміни тиску, температури, швидкості охолодження, структурно-механічних властивостей м'якушки та газової проникності скоринки батона. Ці дані дають змогу враховувати вплив фізико-механічних властивостей продукту на ефективність охолодження [94].

Основними характеристиками виробу, які враховуються в моделі, є початкова вологість, маса, об'єм, пористість і температура після випікання. Вони служать основними параметрами для опису тепломасообміну в процесі вакуумного охолодження [47]. Побудована математична модель враховує, випаровування вологи, газову проникність скоринки, градієнт тиску між середовищем в середині виробу і середовищем вакуумної камери, та тиск у вакуумній камері [28].

Отримані результати досліджень лягли в основу створення узагальненої моделі вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, що дозволяє прогнозувати ефективність вакуумного охолодження та оптимізувати його параметри. Врахування фізико-механічних властивостей та умов процесу дозволяє зробити модель універсальною для подальшого використання у виробничих умовах.

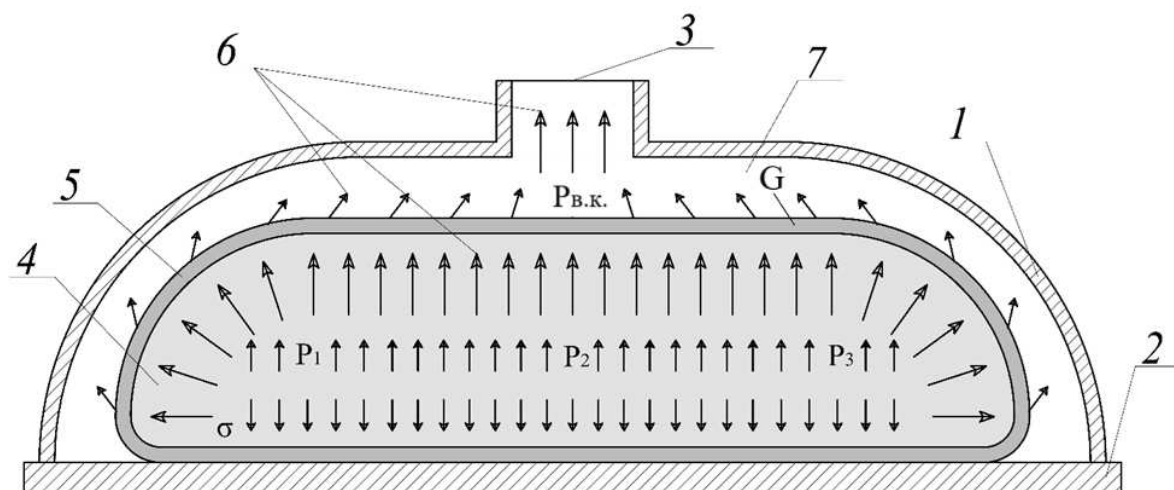


Рис. 3.11. Схема вакуумного охолодження батона:

- 1 – вакуумна камера; 2 – столик вакуумування; 3 – місце підведення вакууму;
4 – м'якушка батона; 5 – скоринка батона; 6 – візуалізація руху пари під час процесу; 7 – середовище вакуумної камери.**

На основі аналізу літературних джерел і результатів експериментальних досліджень вакуумного охолодження батона, а також визначення структурно-механічних властивостей м'якушки та газопроникності скоринки батона, було створено технологічну схему вакуумного охолодження батона (рис. 3.11) та схему визначення режимних параметрів процесу вакуумного охолодження батону (рис 3.12).

Вакуумне охолодження батона відбувається наступним чином (рис. 3.11): через місце підведення вакууму (3) створюється розрідження у вакуумній камері $P_{в.к.}$ (1). Внаслідок зниження тиску починається адіабатне кипіння вологи у всьому об'ємі батона в наслідок того, що $P_1 = P_2 = P_3 = P_6$ (м'якушці 4). Основною перешкодою для виходу пари (6) з батона є скоринка (5) з газовою проникністю G , для того щоб не відбувалося руйнування виробу процес слід проводити таким чином, щоб градієнт тиску між середовищем вакуумної камери (7) та середовищем всередині батона (м'якушкою 4) не перевищував границі міцності м'якушки $\Delta P < \sigma$.

Виходячи зі схеми визначення режимних параметрів процесу вакуумного охолодження батону сформульовано такі положення:

Структурні характеристики батона:

- Батон після випікання розглядається як капілярно-пористе тіло [47].
- Пористість батона становить 68%, що свідчить про значну кількість дрібних пор у його структурі.
- М'якушка батона, характеризується високою газопроникністю, що сприяє легкому випаровуванню вологи, дозволяючи процесу охолодження відбуватися одночасно у всьому об'ємі [47].
- Структурно механічні властивості м'якушки змінюються лінійно залежно від температури: чим вища температура, тим нижча границя міцності. Це означає, що батон при високих температурах є м'якшим і менш стійким до механічних впливів [96].

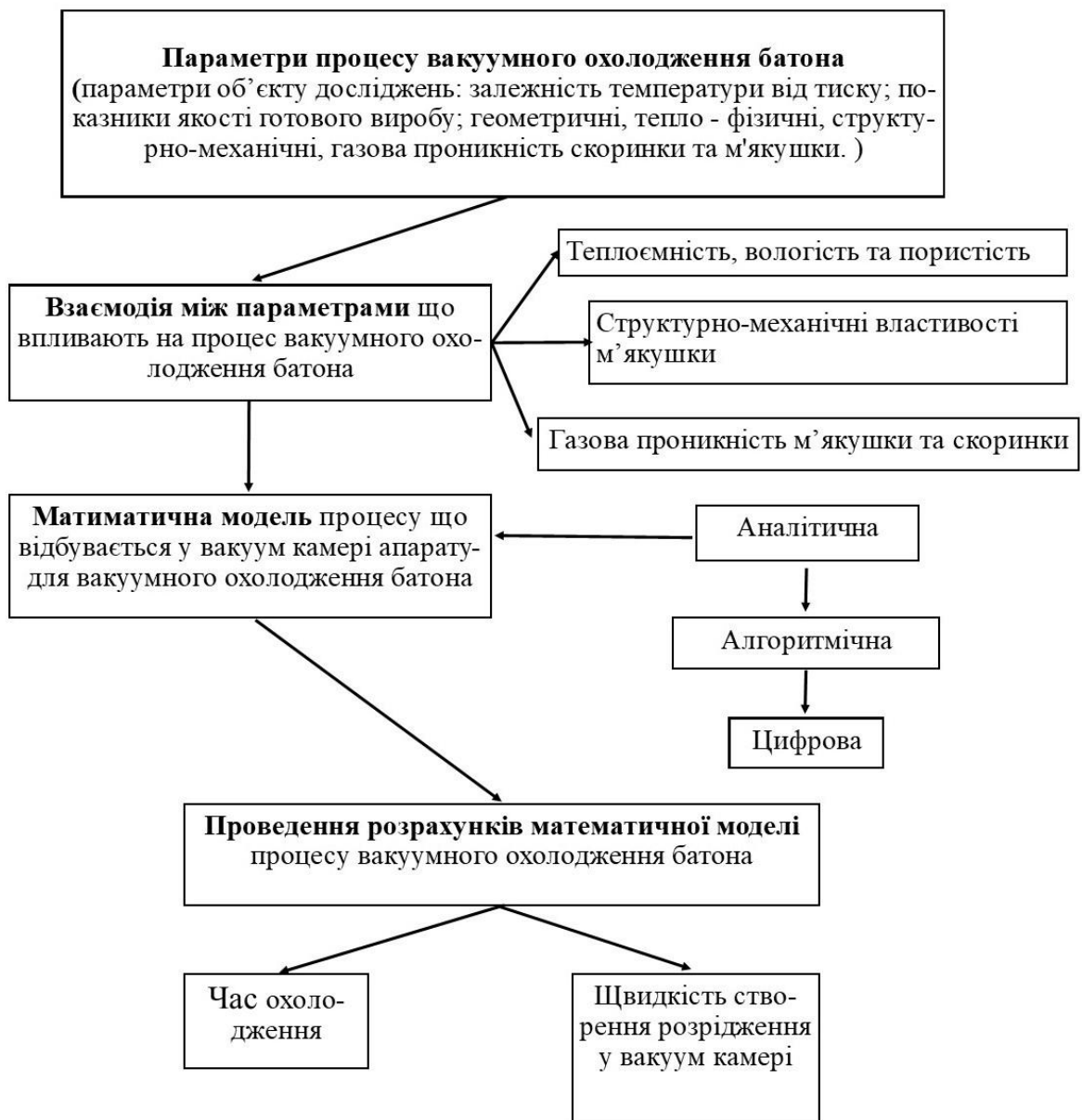


Рис. 3.12. Схема визначення режимних параметрів процесу що відбувається в вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження

Фазові переходи:

- Фазові переходи з «рідини в пару» відбуваються рівномірно по всьому об'єму батона, що гарантує однорідне випаровування вологи та забезпечує рівномірне охолодження продукту [54].

Енергетичний баланс:

- Фазовий перехід відбувається без додаткового підведення тепла ззовні, за рахунок зниження внутрішньої енергії виробу. Це означає, що батон охолоджується за рахунок власної енергії, яка витрачається на випаровування вологи. Як наслідок,

знижується температура виробу, що забезпечує швидке та ефективне охолодження [54].

Таким чином, вакуумне охолодження батона ефективно знижує температуру продукту через випаровування вологи, її рівномірний розподіл по всьому об'єму та зменшення внутрішньої енергії виробу.

На основі сформованих положень розроблено математичну модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату.

3.3 Аналітична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату

Аналітична модель, заснована на розрахунках процесів випаровування вологи, теплообміну, масообміну та механічної міцності м'якушки хліба, дозволяє оцінити динаміку зміни показників якості продукту, зокрема під час його охолодження після випікання. Такий підхід дозволяє детально зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються при охолодженні, і дозволяє врахувати вплив різних параметрів на якість кінцевого продукту [120].

1. Структурно-механічні властивості

З досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки батона нами отримано пряму залежність границі міцності від температури – формула 18.

Ця залежність дозволяє оцінити, як зміни температури впливають на здатність м'якушки протистояти механічним навантаженням під час вакуумного охолодження. Особливо важливо, щоб структура виробу не зруйнувалася під дією градієнта тиску між середовищем вакуумної камери та середовищем в середині виробу.

2. Перепад тиск у між середовищами

Для розрахунку тиску, що виникає всередині батону під час вакуумного охолодження, був використаний закон Бойля-Маріотта [75]. Згідно з цим законом, при сталості кількості газу його тиск і об'єм зворотно пропорційні:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (19)$$

де:

P_1 - тиск у вакуумній камері (Па);

P_2 - тиск всередині батону під час вакуумного охолодження(Па);

V_1 - початковий об'єм газу в батоні (м^3);

V_2 - об'єм газу всередині батону під час вакуумного охолодження (м^3);.

Потік газу через скоринку батона описується рівнянням:

$$J = \frac{\Delta P \cdot G}{L} \quad (20)$$

Де:

J - потік газу через скоринку батону ($\text{м}^3/\text{с}$),

ΔP - різниця тиску між внутрішнім та зовнішнім середовищами (тобто $P = P_1 - P_2$),

G – газова проникність скоринки батону ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$),

L - товщина скоринки батону (м).

Тоді тиск P_2 всередині батону:

З рівняння проникності-концентрації виражаємо різницю тисків P :

$$\Delta P = \frac{J \cdot L}{G} \quad (21)$$

Підставляючи значення різниці тисків ΔP в закон Бойля-Маріотта:

$$P_1 \cdot V_1 = (P_1 - \Delta P) \cdot V_2 \quad (22)$$

Звідки отримуємо:

$$P_1 \cdot V_1 = \left(P_1 - \frac{J \cdot L}{G} \right) \cdot V_2 \quad (23)$$

Беручи до уваги, що об'єм газу всередині батона не змінюється під час вакуумного охолодження, то можна припустити, що $V_1 \approx V_2$. В цьому випадку рівняння спрощується до:

$$P_1 \approx P_2 + \frac{J \cdot L}{G} \quad (24)$$

Звідси ми можемо вивести значення тиску в батоні P_2 що виникає в процесі вакуумного охолодження:

$$P_2 = P_1 - \frac{J \cdot L}{G} \quad (25)$$

Це рівняння дозволяє врахувати вплив газової проникності скоринки на процес охолодження.

3. Випаровування вологи

Для того, щоб волога в середині батона перейшла у пару, потрібно витратити певну кількість тепла, яка визначається через теплоту фазового переходу. Для оцінки кількості випаруваної води $W(\tau)$ з одиниці маси продукту використовуємо рівняння [66]:

$$W(\tau) = \frac{q(\tau) \cdot g_x}{r} \quad (26)$$

де:

$q(\tau)$ - кількість тепла, що витрачається на фазовий перехід води в пару (Дж/кг);

r - теплота фазового переходу (Дж/кг);

g_x – маса виробу (кг).

Кількість теплоти що витрачається на охолодження продукту [66]:

$$q(\tau) = (c_{c.p.} g_{cp} + c_{в.б.} g_{в.б.})(t_m - t_{х.б.}) \quad (27)$$

де:

$q(\tau)$ - кількість теплоти що на охолодження одиниці маси батона (кДж/кг);

t_m - температура батона після виходу з печі (°C);

c_{cp} - питома теплоємність сухої речовини батона (кДж/(кг °C));

$t_{х.б.}$ - температура охолодженого батона (°C).

g_{cp} - вміст сухої речовини батона:

$$g_{cp} = \frac{100 - W_x}{100} \quad (28)$$

де:

W_x - вологість гарячого батона;

$g_{в.б.}$ - вологовміст батона (кг):

$$g_{в.б.} = \frac{W_x}{100} \quad (29)$$

Оскільки 1 кг пари при різних тисках займає різний об'єм, необхідно проводити розрахунки об'єму пари, що утворюється в процесі охолодження [12]:

$$V = V^* \cdot W \quad (30)$$

де:

V^* - об'єм що займає 1 кг пари відповідному тиску (Рис. 3.13).

W – маса води що випарувалася в результаті охолодження.

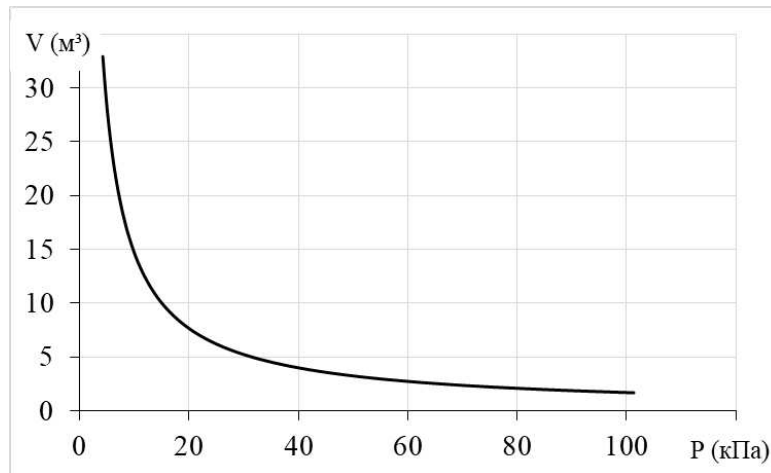


Рис 3.13. Залежність об'єму пари від тиску

Отримані значення дозволяють оцінити кількість вологи, яка випаровується в процесі вакуумного охолодження, і спрогнозувати зміни маси продукту.

4. Масообмін

Кількість випаровуваної вологи залежить від кількості теплоти, що відбирається з хліба на охолодження продукту. Процес масообміну внаслідок випаровування вологи описуємо рівнянням [62]:

$$\frac{dW(\tau)}{d\tau} = \frac{q_v(\tau)}{r} \quad (31)$$

де:

$W(\tau)$ - зміна маси вологи в продукті.

Цей етап моделювання важливий для визначення швидкості випаровування вологи та оцінки її впливу на охолодження.

5. Теплопередача

Температура залежить від кількості теплоти, що передається, теплоємності продукту, а також його об'ємної маси [24]:

$$\frac{dt(\tau)}{d\tau} = - \frac{q_v(\tau)}{c_p \cdot \rho} \quad (32)$$

де

q_v - інтенсивність внутрішніх стоків тепла (Вт);

c_p - питома теплоємність (Дж/(кг °С));

ρ – об'ємна маса продукту (кг/м³).

Це рівняння дозволяє оцінити зміну температури всередині батона в залежності від часу та інтенсивності теплообміну.

На поверхні батону немає теплового потоку відповідно граничні умови для теплового потоку:

$$q(0, \tau) = q(L, \tau) = 0 \quad (33)$$

6. Визначаємо тиск в середині вакуумної камери

Відповідно до температури продукту визначаємо тиск при якому волога в середині продукту буде кипіти [82] (рис. 3.14):

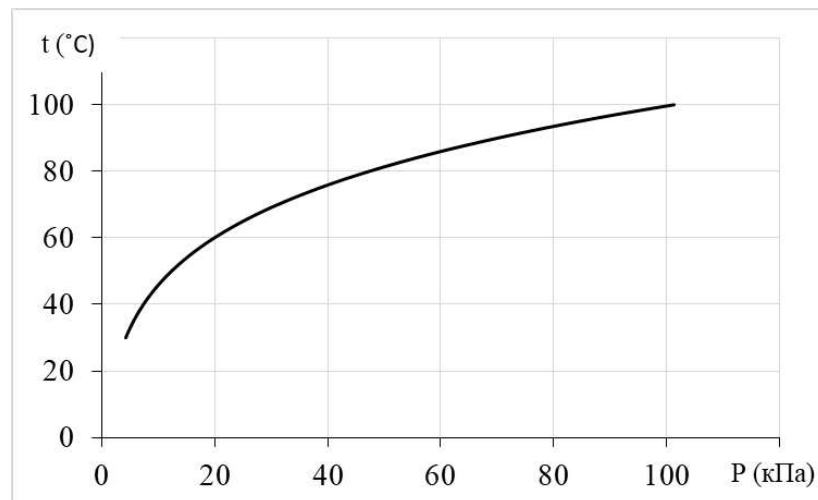


Рис. 3.14. Залежність температури кипіння води від тиску

Ця залежність використовується для визначення режимних параметрів вакуумного охолодження.

7. Граничні умови

Для теплопередачі:

$$t(0, \tau) = T(L, \tau) = t_3 \quad (34)$$

де:

T_3 - температура середовища.

Для тиску:

$$P(0, \tau) = P(L, \tau) = P_k \quad (35)$$

Для міцності м'якушки:

$$\sigma(\tau) \geq \Delta P(\tau) \quad (36)$$

Представлена аналітична модель дозволяє оцінити поведінку батона при вакуумному охолодженні, оптимізувати параметри процесу та забезпечити

збереження фізико механічних показників продукції. Модель враховує всі ключові аспекти, такі як теплообмін, масообмін, випаровування вологи та структурно-механічні властивості м'якушки продукту, що важливо для промислового впровадження.

3.4 Алгоритмічна модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату

Вихідні дані:

1. Температура після випікання t_0 ; початкова вологість продукту W_0 ; початковий тиск P_0 .

2. Властивості матеріалів: питома теплоємність c_p ; густина ρ ; теплота фазового переходу r ; газова проникність скоринки G ; площа скоринки F , границя міцності м'якушки.

Кроки алгоритму:

1. Ініціалізація параметрів:

Початкові умови: температура $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість 42% , тиск $101,325\text{ кПа}$, встановлюємо крок за часом $\Delta\tau$ (1 с) і загальний час моделювання $\tau_{\text{кін}}$.

3. Розрахунок міцності формула 18.

4. Визначаємо перепад тиску між середовищами [75]:

$$P_2 = P_1 - \frac{J \cdot L}{G} \quad (37)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2; \quad (38)$$

5. Розрахунок масообміну [66]:

Визначаємо масу та об'єм випарованої вологи на кожному кроці:

$$W(\tau + \Delta\tau) = \frac{q_v \cdot \Delta\tau}{r} \quad (39)$$

$$V = V^* \cdot W \quad (40)$$

6. Розрахунок теплопередачі [66]:

Розраховуємо температурне поле продукту на наступному кроці часу:

$$t(\tau + \Delta\tau) = t(\tau) - \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \cdot \Delta\tau \quad (41)$$

$$q_v = \frac{r \cdot \Delta W}{\Delta\tau} \quad (42)$$

Відповідно до температури продукту визначаємо тиск при якому вологи в середині продукту буде кипіти (Рис 3.14).

- Збільшуємо час τ на $\Delta \tau = 1$ с.
- Якщо $\tau < \tau_{\text{кін}}$, повертаємося до кроку 2 для обчислення параметрів на новому кроці часу.

8. Завершення моделювання:

- Коли час досягає $\tau_{\text{кін}}$, модель завершена.
- Аналізуємо результати: температурне поле, динаміку випаровування вологи, міцність продукту та інші параметри.

3.5 Узагальнена математична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату

1. Змінні:

$t(x, \tau)$ – температура в середині виробу, °C;

$W(\tau)$ – маса випарованої вологи, кг;

$P_1(\tau), P_2(\tau)$ – Тиск в середині виробу та тиск у вакуумній камері;

$\sigma(\tau)$ – границя міцності м'якушки;

$J(\tau)$ – потік газу через скоринку.

2. Рівняння системи:

- Теплопровідність із випаровуванням:

$$\frac{dt(x, \tau)}{d\tau} = \alpha \cdot \frac{d^2 t(x, \tau)}{dx^2} - \frac{r}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{dW(\tau)}{d\tau} \quad (43)$$

- Випаровування вологи [66]:

$$\frac{dW(\tau)}{d\tau} = \frac{q_v(\tau)}{r} \quad (44)$$

Рівняння перепаду тисків [75]:

$$J(\tau) = \frac{(P_1(\tau) - P_2) \cdot G}{L} \quad (45)$$

де:

J - потік газу через скоринку батону ($\text{м}^3/\text{с}$),

G – газова проникність скоринки батону ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$),

L - товщина скоринки батону (м).

$$P_2(\tau) = P_1(\tau) - \frac{J(\tau) \cdot L}{G} \quad (46)$$

– Умова міцності м'якушки:

$$\sigma(\tau) = -30 t(\tau) + 4500 \quad (47)$$

$$\sigma(\tau) \geq P_1(\tau) - P_2(\tau) \quad (48)$$

– Об'єм пари:

$$V(\tau) = V^* \cdot W(\tau) \quad (49)$$

3. Початкові умови:

$$t(x, 0) = t_0$$

$$W(0) = 0$$

4. Граничні умови:

$$t(0, \tau) = t(L, \tau) = t_{\text{зовн}} \quad (50)$$

$$P(0, \tau) = P(L, \tau) = P_k \quad (51)$$

Всі розрахунки та опрацювання даних математичної моделі проводились в програмі Microsoft Excel, таблиця з проведеними розрахунками представлена в додатку 1 таблиця 2.

3.6 Результати математичного моделювання процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату

В результаті розрахунків математичної моделі процесу вакуумного охолодження батону з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг визначено режимні параметри зниження тиску в часі у вакуумній камері за залежністю, яка представлена на рис. 3.15. За цих умов час охолодження становить 66 секунд.

Під час проведення досліджень режимних параметрів вакуумного охолодження батону було виявлено, що утворена під час випічки скоринка має великий опір, що перешкоджає дифузії водяної пари з середини батону в навколишнє середовище. Отже швидкість охолодження обмежується газопроникністю скоринки та структурно-механічними властивостями м'якушки батону.

При не правильно підбраному зниженні тиску у вакуумній камері викликає градієнт тиску між парою у виробі, що охолоджується, та навколишнім середовищем. Це призводить до розтріскування скоринки батону (рис. 3.1) та відриву м'якушки від нижньої скоринки (рис. 3.2).

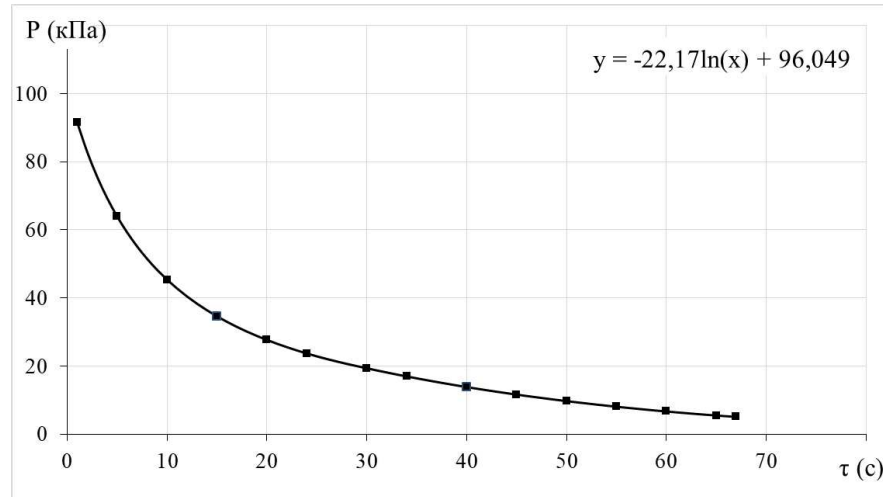


Рис. 3.15. Розрахункові режимні параметри створення розрідження у вакуумній камері

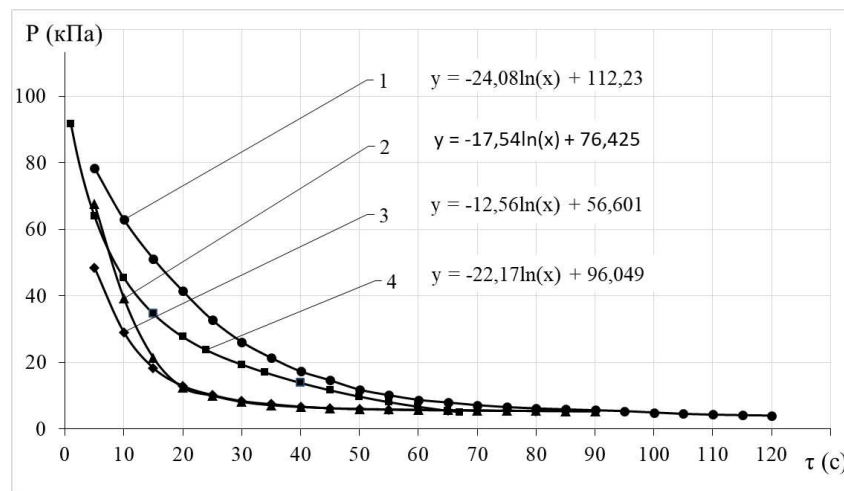


Рис. 3.16. Криві створення розрідження у вакуумній камері:

- 1 – експериментально знайдені режимні параметри зміни тиску в часі у вакуумній камері при яких не відбувається руйнування батона;**
- 2, 3 – експериментально знайдені режимні параметри зміни тиску в часі у вакуумній камері при яких відбувається руйнування батона**
- 4 – розрахунковий режим створення розрідження у вакуумній камері**

Узагальнення та порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними

На вакуумній експериментальній установці нами був встановлений оптимальний режим охолодження батону до температури 30 °С, який представлений на графіку рис. 3.16 крива 1. Криві 2 і 3 рис. 3.16 відповідають зразкам 2 і 3 на рис. 3.2, і при таких режимах виявлено, що відбувається розрив м'якушки досліджуваного зразка, що не відповідає встановленим вимогам якості.

За режимом, зображеним кривою 1 на рис. 3.16, час охолодження батону масою 0,5 кг складає 2 хвилини, а максимальна допустима швидкість розрідження – 4,5 кПа/с.

В результаті проведених досліджень, літературного огляду та розрахунків математичної моделі отримано режимні параметри зміни тиску у вакуумній камері при яких не відбуватиметься руйнування батона (рис.3.16 крива 4), а час охолодження складатиме 66 с.

3.7 Висновки до розділу

Проведено комплексне експериментальне та теоретичне дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів з метою встановлення ключових факторів, що впливають на ефективність охолодження та якість продукції. Основна увага приділялася аналізу фізико-механічних характеристик виробу, зокрема газової проникності, структурно-механічних властивостей, а також особливостям динаміки зниження тиску у вакуумній камері. В ході науково-дослідної роботи отримано наступні результати:

1. Результати проведених досліджень процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на вакуумній експериментальній установці показали, що швидкість зниження тиску у вакуумній камері є фактором, який впливає не тільки на тривалість охолодження, але й на якість готової продукції. Занадто швидке зниження тиску може призвести до руйнування структури батона, зокрема до розтріскування скоринки та розриву м'якушки, внаслідок виникнення надмірного градієнту тиску між внутрішнім середовищем виробу та середовищем вакуумної камери.

2. Дослідження газової проникності скоринки та м'якушки батона показало, що скоринка хліба є основною перешкодою для виходу пари з виробу, тобто характеризується відносно низькою газовою проникністю ($0,32 \dots 0,42 \text{ (м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))$),

тоді як м'якушка має відносно високу газову проникність ($1,5 \dots 9,4 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), що практично не обмежує перебіг процесу вакуумного охолодження. Газова проникність скоринки також варіюється по її поверхні, з найнижчими значеннями в центральній частині, що пояснюється нерівномірним термічним впливом під час випікання.

3. Аналіз структурно-механічних властивостей м'якушки показав, що границя міцності м'якушки обернено пропорційна до її температури: чим вища температура м'якушки тим менша границя міцності. Це підкреслює важливість контролю режимних параметрів процесу вакуумного охолодження для запобігання деформації та руйнування виробу в процесі охолодження.

4. Розроблена математична модель процесу вакуумного охолодження у вакуумній камері апарату, яка враховує вище перераховані фактори, включаючи газову проникність скоринки, перепад тиску, випаровування вологи та структурно-механічні властивості м'якушки. Це дозволяє визначати такі режимні параметри зниження тиску у вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження в часі, за яких не відбувається руйнування продукту.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ БАТОНУ

4.1 Розгляд структури обладнання для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

Аналіз наявних патентних конструктивних рішень дозволить виокремити основні структурні елементи обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва, що у свою чергу, стане підґрунтям для розроблення раціональної структури власної конструкції апарата:

Апарат для вакуумного охолодження свіжовипеченого хліба (Патент на корисну модель №146333) містить (рис. 4.1): вакуумні камери і підключену до них вакуумну систему для видалення пари і повітря, що забезпечує необхідний рівень вакууму. Камери встановлені на роторі, що обертається, і оснащені рухомими кришками. Ротор містить пристрої для завантаження і розвантаження вакуумних камер.

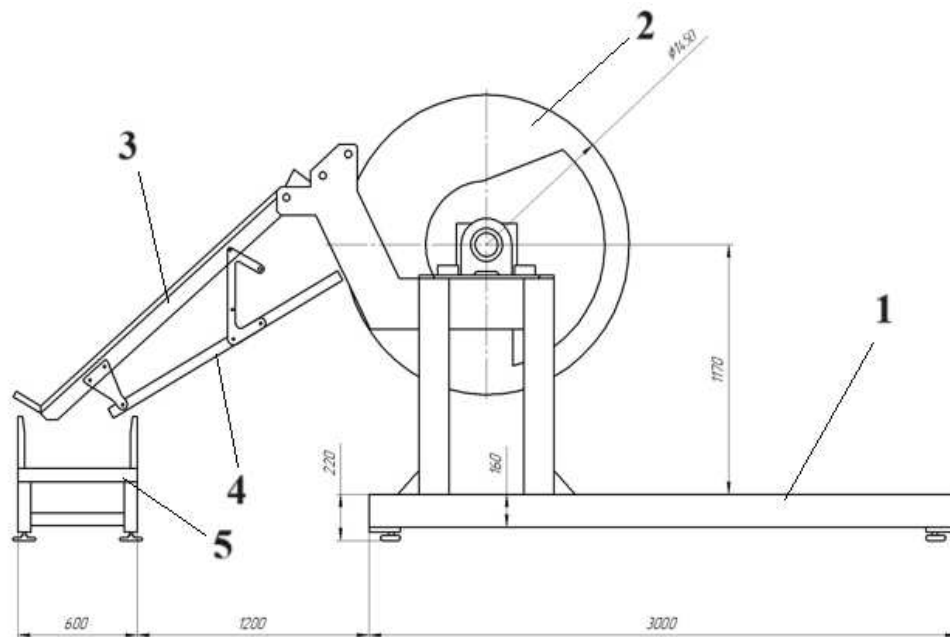


Рис. 4.1. Апарат для вакуумного охолодження свіжовипеченого хліба:

1 – рама; 2 – ротор з вакуумними камерами;

3 – конвеєр для завантаження гарячих виробів; 4 – вивантажувальна гірка; 5 – конвеєр для охолодженої продукції

Переваги: механізація, можливість одночасної обробки декількох порцій продукції.

Недоліки: висока металоємність, складна система ущільнень.

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з рухомим столиком (Патент на корисну модель № 156000) містить (рис. 4.2): вакуумну камеру і підключену до неї систему створення розрідження для видалення пари і повітря і забезпечення необхідного рівня вакууму. Використовуються вакуумні камери роз'ємного типу, що складаються з нерухомої кришки та рухомого столу. Додатково пристрій оснащений напрямними для завантаження і розвантаження.

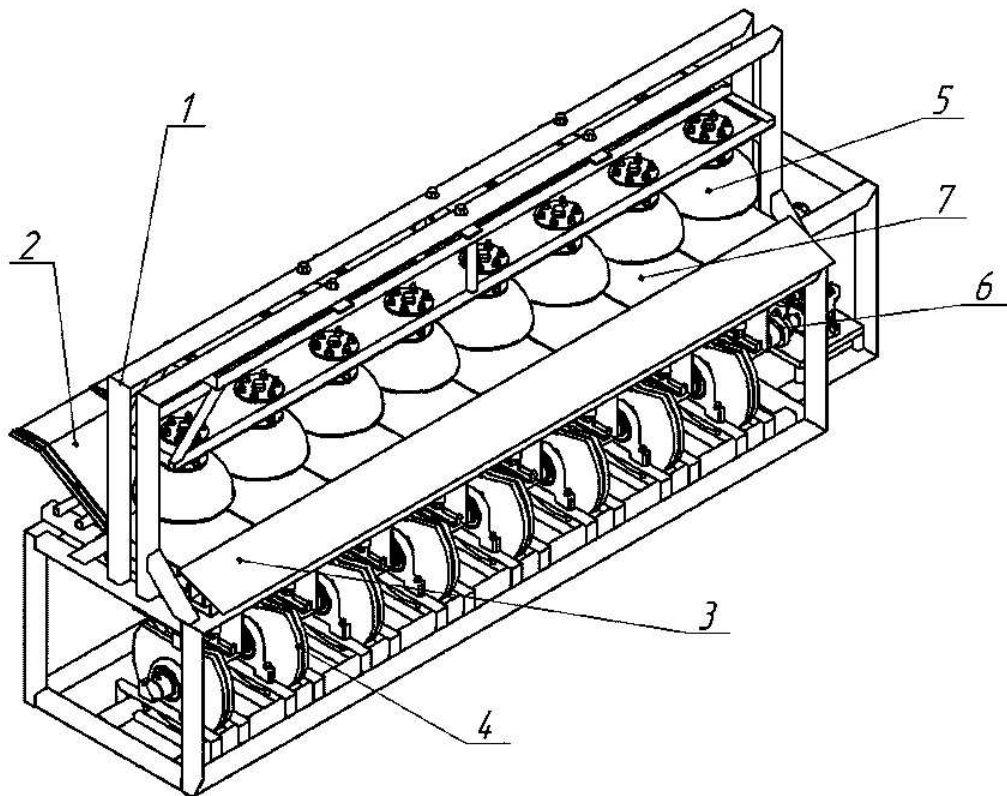


Рис. 4.2. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з рухомим столиком:

**1 – рама; 2 – приймальна похила з направляючими;
3 – вивантажувальна похила; 4 – кулачковий механізм; 5 – вакуумні камери; 6 – електропривод; 7 – підйомні столики.**

Переваги: механізація, компактність, відсутність складних ущільнень, простота конструкції.

Недоліки: жорсткі режимні параметри охолодження без можливості їх корегування, що зменшує асортимент виробів.

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з завантажувальним пристроєм (Патент на корисну модель №156905) містить (рис. 4.3): вакуумні камери з підключеною до них системою створення розрідження для видалення пари та повітря та забезпечення необхідного рівня вакууму. Вакуумні камери роз'ємного типу з рухомими кришками і столиком, який також виконує функцію розвантажувального механізму. Апарат додатково оснащений завантажувальним пристроєм.

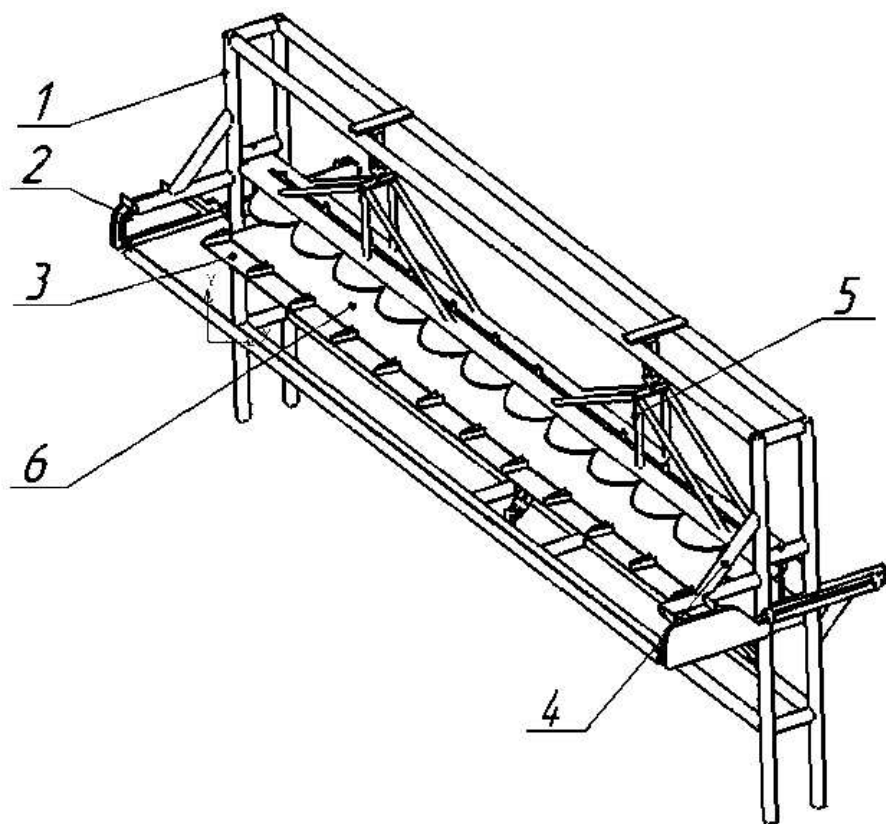


Рис. 4.3. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з завантажувальним пристроєм:

- 1 – рама; 2 – захватний пристрій; 3 – напрямні; 4 – вакуумні камери;
5 – під'ємно-опускний механізм; 6 – вивантажувальний пристрій.**

Переваги: механізація, точність позиціонування, зменшення ручної праці.

Недоліки: аналогічні попередньому – обмежені можливості налаштування параметрів процесу.

В таблиці 4.1 наведено структурне порівняння патентних рішень.

Структурна порівняльна таблиця патентних рішень

Критерій	Патент №146333	Патент №156000	Патент №156905
Тип вакуумної камери	На роторі, рухомі кришки	Роз'ємна: нерухома кришка, рухомий столик	Роз'ємна: рухома кришка, рухомий столик
Система завантаження	Приймальна гірка з напрямними → завантажувальний конвеєр → захватний пристрій	Приймальна гірка з напрямними	Автоматичний захватний пристрій
Система розвантаження	Розвантажувальний механізм на роторі → виванта-жувальна гірка	Столик виконує функцію розвантаження	Вивантажувальний пристрій
Рівень механізації	Високий, але складний в реалізації	Середній, обмежена адаптивність	Середній, обмежена адаптивність
Переваги	Багатокамерність, компактність	Компактність, простота, дешевизна	Компактність, точність позиціонування, дешевизна
Недоліки	Складність реалізації системи підведення вакууму	Жорсткі параметри охолодження, обмежений асортимент	Жорсткі параметри охолодження, обмежений асортимент

Параметри тунельної печі на лінії виробництва батонів

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва призначений для роботи на потоковій лінії виробництва батонів з тунельною піччю площею поду 25 м². Продуктивність апарату залежить від продуктивності печі [3].

Годинна продуктивність печі за год $P_{\text{год}}$, кг/год:

$$P_{\text{год}} = \frac{N \cdot n \cdot g \cdot 60}{\tau_{\text{вип}}} \quad (42)$$

де:

g - маса виробу, кг;

N — кількість рядів виробів що одночасно знаходяться на поду печі, шт.;

$\tau_{\text{вип}}$ — час випікання, хв;

n — кількість виробів в одному ряду, шт.

Кількість виробів в одному ряду розраховуємо на основі ширини поду, геометричних параметрів виробу, способу укладання та відстані між ними за такою формулою [3]:

$$n = \frac{B-a}{b+a} \quad (43)$$

де:

a — проміжок між виробами, мм.

B — ширина поду, мм;

b — ширина виробу, мм;

Для виробів, що за нормативною документацією не повинні мати притисків, відстань a становить 20–40 мм, а для виробів з можливими притисками (наприклад, арнаут київський) a складає 5–10 мм.

Кількість рядів виробів, які можуть одночасно знаходитися на поду тунельної печі N , шт., визначаємо за формулою:

$$N = \frac{L-a}{l+a} \quad (44)$$

де:

L — довжина поду печі;

l — ширина або довжина батона, мм

Розміри сітчастого поду тунельної печі визначаються за технічною характеристикою печі або на основі даних довідкової літератури.

Продуктивність тунельної печі з площею поду 25 м² (довжина поду 23800 мм, ширина 2100 мм) при випіканні батонів масою 0,5 кг та розмірами 300 x 120 мм, з проміжком між виробами 30 мм, визначаємо за умови тривалості випікання 25 хвилин.

Кількість виробів в одному ряду:

$$n = \frac{2100-30}{300+30} = 6,27 \quad (45)$$

Приймаємо 6 шт.

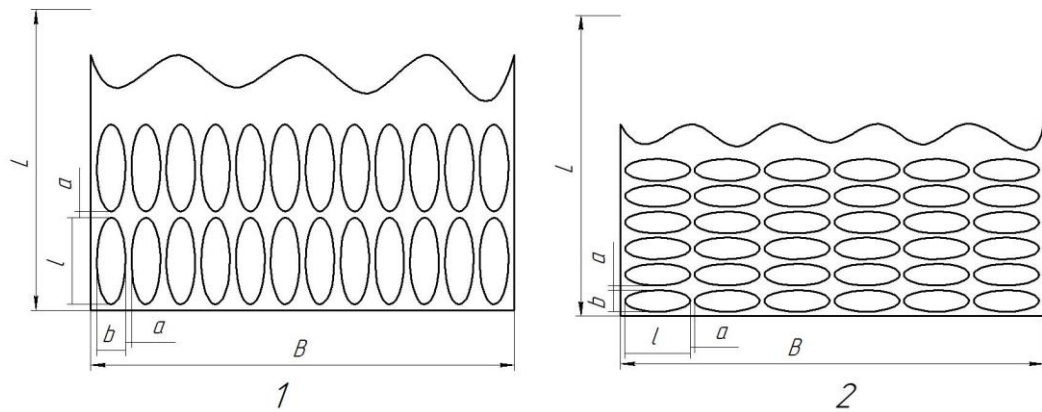


Рис. 4.4. Варіанти розміщення батоноподібних подових виробів на поду тунельної печі:

1 – при ручному укладанні на листах; 2 – за механізованого укладання

Кількість рядів виробів, які можуть одночасно знаходитися на поду тунельної печі, становить:

$$N = \frac{12000-30}{120+30} = 79,8 \quad (46)$$

Приймаємо 79 шт.

Тоді продуктивність печі $P_{\text{год}}$, кг/год дорівнює:

$$P_{\text{год}} = \frac{79 \cdot 6 \cdot 0,5 \cdot 60}{25} = 568 \text{ кг/год} \quad (47)$$

Годинна штучна продуктивність:

$$P_{\text{год. шт.}} = \frac{N \cdot n \cdot 60}{\tau_{\text{вип}}} = \frac{79 \cdot 6 \cdot 60}{25} = 1137,6 \text{ шт/год} \quad (48)$$

Приймаємо 1138 шт/год.

Отже продуктивність лінії виробництва батонів масою 0,5 кг із встановленим апаратом для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва становитиме 568 кг/год або 1138 шт/год.

Структурна схема апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва

На основі аналізу патентних рішень та опираючись на параметри тунельної печі визначено найбільш доцільні структурні елементи, які забезпечують ефективність та адаптивність апарату для вакуумного охолодження хліба до умов потокового виробництва:

- Тип вакуумної камери: з огляду на простоту обслуговування і мінімізацію складних ущільнень, вибрано конструкцію роз'ємного типу з рухомою кришкою та нерухомим столом (як у Патентах №156000 і №156905). Така конструкція забезпечує герметичність при мінімальній кількості рухомих з'єднань.
- Механізація завантаження/розвантаження: для забезпечення безперервного потоку обрано конвеєрну систему, що дозволяє накопичувати порції виробів і подавати їх у вакуумну камеру також передбачено об'єднання функцій завантаження і розвантаження в єдиний механізм, що дозволяє зменшити кількість приводів і оптимізувати розміщення елементів в апараті. Основою стали елементи з Патентів №146333 та №156905.
- Потоковість: враховано принцип порційної роботи — після охолодження порція автоматично замінюється новою, що дозволяє організувати безперервний цикл з мінімальними паузами.

На підставі цих рішень була сформована структурна схема апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва (рис. 4.5),



Рис. 4.5. Структурна схема апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів у умовах потокового виробництва функціонує таким чином: щойно випечений батон з поду печі надходить на гірку з направляючими та крокоміром, після чого переміщається на накопичувальний конвеєр із крокомірами. Коли накопичується порція з 4 виробів (1 порція), захватний механізм переміщає їх на вакуумний столик. Потім порція батонів накривається вакуумною камерою та охолоджується. Після завершення охолодження нова порція, що надходить на столик, автоматично виштовхує охолоджені батони на розвантажувальні конвеєри з направляючими, які транспортують готові вироби до подальших операцій, таких як нарізання та пакування.

4.2 Визначення кута приймальної гірки апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

У конструкції апарату для вакуумного охолодження хліба важливо забезпечити ефективно, швидко та надійне транспортування хлібобулочних виробів до зони завантаження на столик для вакуумування. Одним з ключових етапів цього процесу – подача виробів на накопичувальний конвеєр з крокоміром, який не лише транспортує, а й виконує функцію позиціонування для подальшого переміщення гарячих виробів на столик для вакуумування за допомогою завантажувального механізму. Для мінімізації кількості приводів, підвищення надійності конструкції та зменшення енерговитрат доцільно реалізувати самопливне переміщення виробів (батонів) під дією сили тяжіння [1, 3]. З цією метою необхідно визначити раціональний кут нахилу приймальної гірки, який забезпечує рух батонів без додаткового механічного спонукання, не допускаючи при цьому надмірного прискорення, що може спричинити пошкодження продукції або порушення її орієнтації [3].

Із вихідних параметрів які нам відомі визначимо необхідний кут нахилу приймальної гірки для завантаження батона за допомогою сили тяжіння до накопичувального конвеєра. Схему руху батону по приймальній гірці зображено на рис. 4.6 [1, 3].

Складемо рівняння проекцій всіх сил на осі Декартової системи координат (рис. 4.6) [3]:

$$Ox: m \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{\text{тр}} = m \cdot a; \Rightarrow a = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{\text{тр}}}{m} \quad (49)$$

де:

m – маса виробу;

g – прискорення вільного падіння;

α – кут нахилу приймальної гірки;

$F_{\text{тр}}$ – сила тертя пшеничних сортів хліба об метал;

a – прискорення;

$$Oy: N - m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0; \Rightarrow N = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (50)$$

де:

N – реакція опори;

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (51)$$

де:

μ – коефіцієнт тертя пшеничних сортів хліба об метал $\mu=0,3\dots0,7$. У розрахунках приймаємо середнє значення: $\mu=0,5$;

$$a = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha}{m} \quad (52)$$

Та час необхідний для проходження батоном приймальної гірки при рівноприскореному русі без початкової швидкості [1]:

$$l = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot l}{a}} \quad (53)$$

де:

l – довжина гірки;

t – час необхідний для проходження батоном приймальної гірки;

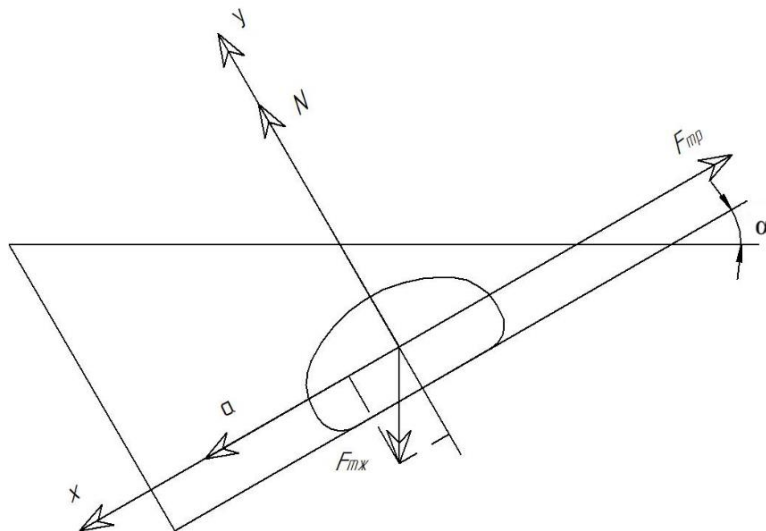


Рис. 4.6. Схема руху батону по приймальній гірці

З метою визначення раціонального кута нахилу приймальної гірки було проведено розрахунки для різних значень кута: 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° та 40° . Результати розрахунків наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

**Результати розрахунків визначення раціонального кута нахилу
приймальної гірки**

Кут нахилу приймальної гірки (α)	Прискорення (a)	Час необхідний для проходження батоном приймальної гірки (t)
10°	-3,12699	Не відбувається руху
15°	-2,19885	Не відбувається руху
20°	-1,25397	Не відбувається руху
25°	-0,29955	Не відбувається руху
30°	0,657145	1,103352
35°	1,608844	0,705161
40°	2,548298	0,560299

В результаті аналізу встановлено, що кут нахилу приймальної гірки 30° є достатнім для забезпечення самовпливного руху батона масою 0,5 кг до накопичувального конвеєра. Подальше збільшення кута нахилу є недоцільним. За таких умов батон проходить гірку приблизно за 1 секунду що відповідає умовам роботи апарату.

4.3 Визначення закону руху завантажувального механізму апарату для вакуумного охолодження хліба

У конструкції апарату для вакуумного охолодження хліба важливим елементом конструкції є завантажувальний механізм, який здійснює транспортування продукції до вакуумної камери та її вивантаження після завершення процесу охолодження. В умовах потокового виробництва та автоматизованої подачі виробів необхідно забезпечити не лише високу швидкість механізму, а й плавність переміщень, що виключає пошкодження виробів та їх зміщення відносно посадкових елементів [1,].

Завантажувальний механізм апарату для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва виконує цикл переміщення, що включає наступні етапи:

1. опускання завантажувального механізму до рівня виробів – відстань 180 мм тривалість етапу 1 с;
2. горизонтальне переміщення (переміщення виробів на столик для вакуумування) – відстань 610 мм тривалість етапу 4 с;

3. підняття завантажувального механізму – відстань 180 мм тривалість етапу 1 с;
4. повернення у вихідне положення – відстань 610 мм тривалість етапу 4 с.

Щоб забезпечити плавність переміщення, мінімізувати ривкові навантаження та вібрації, прийнято використання синусоїдального закону переміщення для кожного з етапів. Такий закон має наступні властивості [1, 3]:

- нульова швидкість на початку та в кінці фази;
- нульове прискорення в крайніх точках;
- гладкий профіль прискорення та швидкості.

Нехай рух від початкового положення s_0 до кінцевого s_k за час τ , де s – узагальнене позначення координати (наприклад X або Z). Візьмо функцію виду [1, 3]:

$$s(t) = A \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{\tau}\right) + B \quad (54)$$

де:

t – локальний час усередині кожної фази руху;

A – амплітуда зміни координати (половина різниці між кінцевим і початковим положенням);

B – зсув (середнє значення між початковим і кінцевим положенням).

Задаємо початкові умови:

$$s(0) = s_0 \quad (55)$$

$$s(\tau) = s_k \quad (56)$$

Підставляємо у функцію:

$$\begin{cases} s(0) = A \cdot \cos(0) + B = A + B = s_0 \\ s(\tau) = A \cdot \cos(\pi) + B = -A + B = s_k \end{cases} \quad (57)$$

Розв'язавши систему отримуємо:

$$A = \frac{s_k - s_0}{2} \quad (58)$$

$$B = \frac{s_k + s_0}{2} \quad (59)$$

Тоді функція набуває вигляду:

$$s(t) = \frac{s_k - s_0}{2} \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{\tau}\right) + \frac{s_k + s_0}{2} \quad (60)$$

Після перетворення отримуємо:

$$s(t) = s_0 + \frac{s_k - s_0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot t}{\tau} \right) \right) \quad (61)$$

З врахуванням конкретних значень, координати переміщення механізму описуємо як:

- Опускання завантажувального механізму до рівня виробів по осі Z:

$$Z(t) = 0 + \frac{-180 - 0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot t}{1} \right) \right), t \in [0; 1] \quad (62)$$

- Горизонтальне переміщення завантажувального механізму по осі X:

$$X(t) = 0 + \frac{610 - 0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t-1)}{4} \right) \right), t \in [1; 5] \quad (63)$$

- Підняття завантажувального механізму по осі Z:

$$Z(t) = -180 + \frac{0 + 180}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t-5)}{1} \right) \right), t \in [5; 6] \quad (64)$$

- Повернення у вихідне положення по осі X

$$X(t) = 610 + \frac{0 - 610}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t-6)}{4} \right) \right), t \in [6; 10] \quad (65)$$

На рис. 4.7 та 4.8 представлено зміну координат $X(t)$ та $Z(t)$ впродовж повного циклу роботи завантажувального механізму.

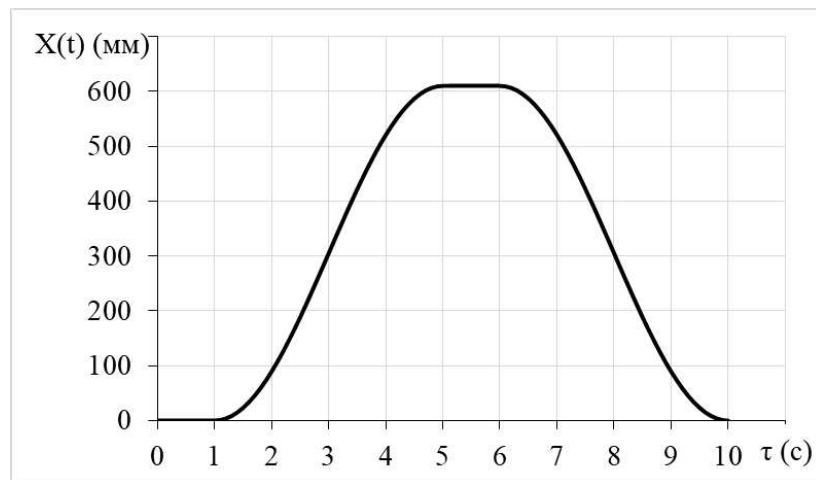


Рис. 4.7. Закон горизонтального переміщення завантажувального механізму

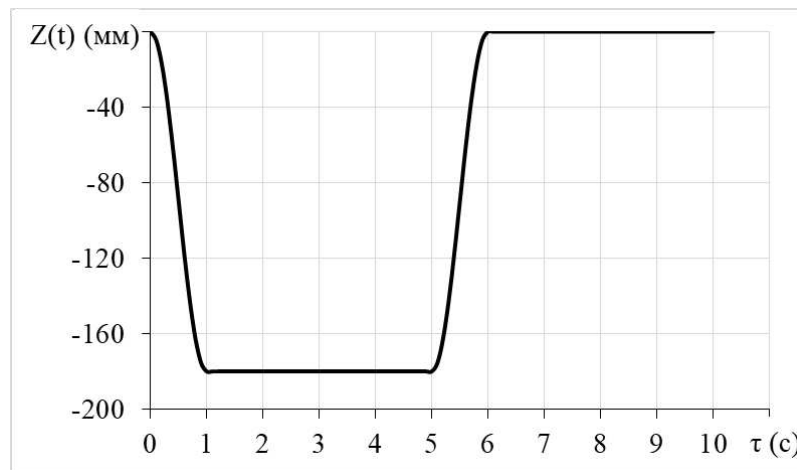


Рис. 4.8. Закон вертикального перемещения завантажувального механізму

Розроблений закон руху завантажувального механізму на основі синусоїдальної функції забезпечить плавне переміщення продукту без ризиків його пошкодження. Розроблений закон дозволяє знизити динамічні навантаження, підвищити точність позиціонування, та узгодити роботу механізму з циклом подачі виробів на столик для вакуумування [1]. Отримані залежності використані для подальшого розроблення циклограми роботи робочих органів апарату.

4.4 Аналіз раціональної кількості батонів у вакуумній камері апарату

Одним із важливих рішень під час проектування апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів є вибір способу організації охолодження продукції: чи слід передбачити окрему камеру для кожного батона, поєднати вироби в пари, чи реалізувати групове охолодження всіх батонів одночасно в одній камері. Це рішення має суттєвий вплив на конструктивну складність, металоємність, енергоспоживання, надійність системи та її узгодженість з іншими елементами апарату.

З одного боку, індивідуальне або зоноване охолодження дозволяє точніше контролювати параметри процесу для кожного виробу. З іншого – воно ускладнює конструкцію апарату, збільшує витрати на виготовлення та експлуатацію і може бути недоцільним для умов потокового виробництва.

Опираючись на результати розрахунків математичної моделі процесу вакуумного охолодження батону з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг

визначено режимні параметри зниження тиску в часі у вакуумній камері. За цих умов час охолодження становить 66 секунд (рис. 3.15).

Водночас, відповідно до параметрів роботи тунельної печі, батони виходять з неї з інтервалом 22 с. щоб забезпечити узгодженість між ланками технологічного процесу, вироби необхідно накопичувати перед завантаженням у камеру, а саме охолодження реалізувати партіями (порціями) по 4 батони. У такому випадку загальний цикл роботи апарата становитиме 88 с: 66 с – охолодження, 22 с – допоміжні операції (завантаження, вирівнювання тиску у вакуумній камері до атмосферного, розвантаження тощо).

Вибір матеріалу вакуумної камери

Матеріали вакуумної камери повинні бути стійкі до низького тиску, оскільки в процесі відбувається значне зниження тиску, що створює механічні навантаження на стінки камери. Для цього найчастіше використовують нержавіючу сталь, або спеціальні алюмінієві сплави, які забезпечують необхідну міцність і стійкість до корозії. Герметичність критично важлива для стабільної роботи системи [1].

Нами обрано марку сталі AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2), яка забезпечує відмінну стійкість до корозії, особливо в агресивних або вологих умовах, і повністю відповідає вимогам харчової безпеки. Ця сталь характеризується низьким вмістом вуглецю, що робить її ідеальною для зварювання, зберігаючи високу міцність і антикорозійні властивості навіть у зварних швах. Завдяки цим характеристикам AISI 316L є оптимальним вибором для виготовлення вакуумних систем, які використовуються в харчовій промисловості [3].

Мінімальна товщина стінки для вакуумних систем визначається кількома основними факторами. Глибина рохридження є ключовим параметром: чим нижчий робочий тиск у вакуумній камері, тим вище навантаження на стінки, що може призвести до їх деформації і як наслідок розгерметизації. В таких умовах необхідно збільшити товщину стінки для забезпечення механічної стійкості. Діаметр труб або розміри камер також має значення: в конструкціях з великим розміром тонкі стінки

більш схильні до деформації під впливом зовнішнього тиску, тому вимагають додаткового посилення [3].

Сталь AISI 316L завдяки своїй високій міцності та стійкості до механічних навантажень дозволяє оптимізувати товщину стінки без шкоди для надійності системи. Як правило, для труб і камер з цієї нержавіючої сталі, що працюють в умовах розрідження, рекомендована мінімальна товщина стінки 2,5-3 мм, приймаємо товщину стінки 3 мм [3].

Визначення раціональної кількості бачонів у вакуумній камері

При визначенні конфігурації вакуумної камери з точки зору кількості бачонів які охолоджуються розглянемо три основні варіанти:

1. Індивідуальні камери для кожного бачона.

Такий варіант забезпечує найвищу точність та контроль процесу охолодження, оскільки параметри у кожній камері можна регулювати окремо. Проте реалізація цього варіанту передбачає забезпечення кожної індивідуальної камери відповідним обладнанням: клапанами, системою підведення вакууму тощо.

На рис. 4.9 представлено креслення вакуумних камер, призначених для індивідуального охолодження кожного бачона в складі порції. Така компоновка передбачає наявність окремого герметичного об'єму для кожного виробу, що ускладнює конструкцію, але забезпечує незалежне регулювання параметрів охолодження.

Моделювання відбувалося в середовищі SolidWorks, відповідно до результату аналізу вакуумних камер маса такої компоновки складає 15,8 кг.

Визначимо об'єм вакуумних камер та необхідну продуктивність вакуумного насосу при використанні такої компоновки.

Об'єм одної вакуумної камери буде складатись з об'єму паралелепіпеда та об'єму циліндра:

$$V_i = V_{\pi} + V_{\text{ц}} = 0.004455 + 0,000104 = 0,004559 \text{ м}^3 \quad (66)$$

де:

V_{π} – об'єм паралелепіпеда;

$$V_{\Pi} = a \cdot b \cdot h = 0,15 \cdot 0,33 \cdot 0,09 = 0,004455 \text{ м}^3 \quad (67)$$

де:

a – ширина паралелепіпеда;

b – довжина паралелепіпеда;

h – висота паралелепіпеда;

V_{Π} – об'єм циліндра;

$$V_{\Pi} = \pi \cdot r^2 \cdot h_{\Pi} = \pi \cdot 0,025^2 \cdot 0,053 = 0,000104 \text{ м}^3 \quad (68)$$

r – радіус циліндра;

h_{Π} – висота циліндра;

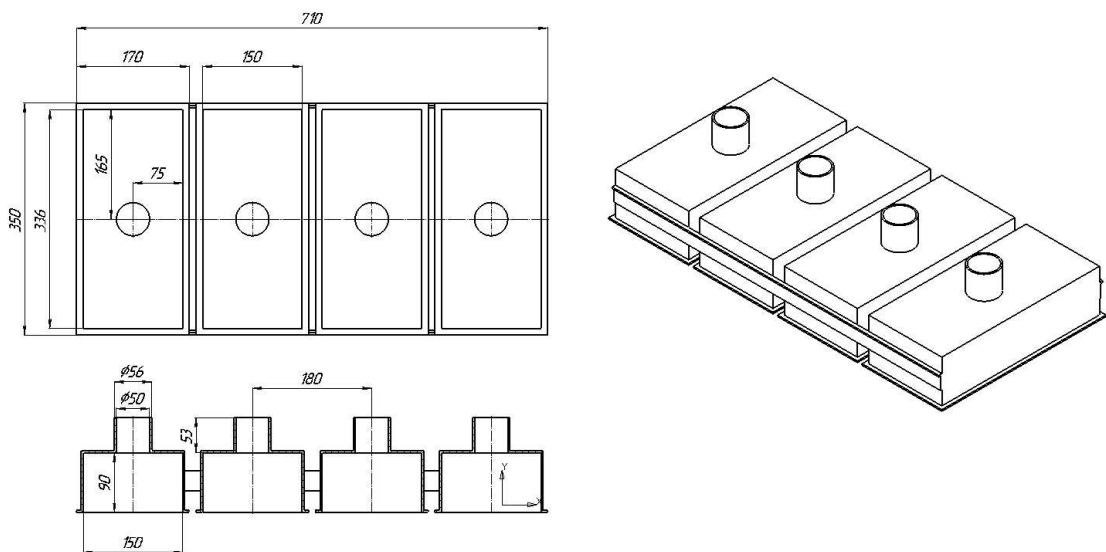


Рис. 4.9. Креслення вакуумних камер призначених для індивідуального охолодження кожного батона в складі порції

Необхідна продуктивність вакуумного насосу при використанні вакуумних камер призначених для індивідуального охолодження кожного батона в складі порції [1]:

$$S = \frac{V_{\text{заг}}}{t} \cdot \ln \frac{P_a}{P_k} \cdot F \quad (69)$$

$$S = \frac{4,909}{66} \cdot \ln \frac{101325}{4000} \cdot 2.5 = 0,6007 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$S_{\text{год}} = S \cdot 3600 = 0,6007 \cdot 3600 = 2162 \text{ м}^3/\text{Год} \quad (70)$$

де: $V_{\text{заг}}$ – об'єм який необхідно відкачувати за 1 цикл, м^3 ;

$$V_{\text{заг}} = (V_i \cdot n_k) + (V_{\text{пар}} \cdot n_b) \quad (71)$$

$$V_{\text{заг}} = (0,004559 \cdot 24) + (0,2 \cdot 24) = 4,909 \text{ м}^3$$

V_i – об’єм вакуумної камери, м³;

$V_{\text{пар}}$ – об’єм пари, що утворюється при охолодженні одного батону масою 0,5 кг з 100 до 30 °С., м³(0,2 м³ з виробу);

n_k – кількість вакуумних камер;

n_b – кількість виробів що охолоджуються;

t – тривалість циклу, с;

P_a – початковий тиск, Па;

P_k – кінцевий тиск, Па;

F – коефіцієнт кривої відкачування;

2. Парне охолодження батонів.

Такий варіант частково знижує ускладнення, проте все ще вимагає кількох камер або розділення об’єму вакуумної камери на незалежні секції. Така система також передбачає забезпечення кожної камери відповідним обладнанням: клапанами, системою підведення вакууму тощо

На рис. 4.10 представлено креслення вакуумних камер, призначених для парного охолодження кожного батона в складі порції. Така компоновка передбачає наявність окремого герметичного об’єму двох виробів, що ускладнює конструкцію, але забезпечує більш точне регулювання параметрів охолодження.

Моделювання відбувалося в середовищі SolidWorks, відповідно до результату аналізу вакуумних камер маса такої компоновки складає 11,6 кг.

Визначимо об’єм вакуумних камер та необхідну продуктивність вакуумного насоса при використанні такої компоновки.

Об’єм одної вакуумної камери буде складатись з об’єму паралелепіпеда та об’єму циліндра (формула 66):

$$V_{\text{п.б}} = 0.008316 + 0.000104 = 0.00842 \text{ м}^3$$

де:

$V_{\text{п}}$ – об’єм паралелепіпеда (формула 67);

$$V_{\text{п}} = 0,28 \cdot 0,33 \cdot 0,09 = 0.008316 \text{ м}^3$$

$V_{\text{ц}}$ – об’єм циліндра (формула 68);

$$V_{\text{ц}} = \pi \cdot r^2 \cdot h_{\text{ц}} = \pi \cdot 0,025^2 \cdot 0,053 = 0,000104 \text{ м}^3$$

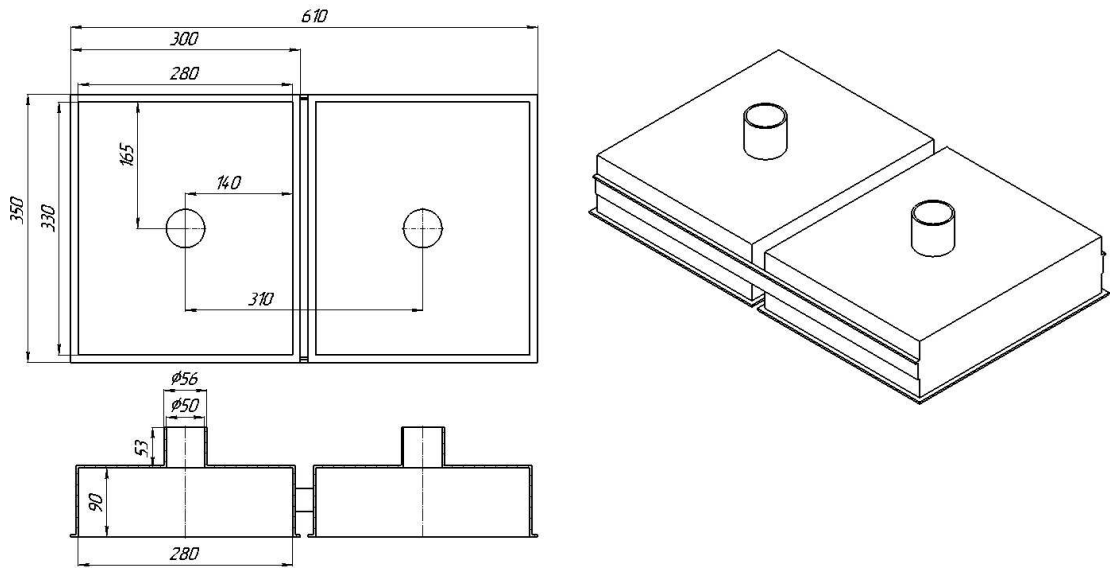


Рис. 4.10. Креслення вакуумних камер призначених для парного охолодження кожного батона в складі порції

Необхідна продуктивність вакуумного насосу при використанні вакуумних камер призначених для парного охолодження кожного батона в складі порції [1] (формула 69...71):

$$V_{\text{заг}} = (0,00842 \cdot 12) + (0,2 \cdot 24) = 4,901 \text{ м}^3$$

$$S = \frac{4,901}{66} \cdot \ln \frac{101325}{4000} \cdot 2,5 = 0,6007 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$S_{\text{год}} = 0,6007 \cdot 3600 = 2162 \text{ м}^3/\text{год}$$

3. Групове охолодження.

Цей варіант конструктивно найпростіший і повністю узгоджується з потоковим виробництвом. Завдяки завантаженню батонів в одну вакуумну камеру забезпечується стабільна тривалість циклу, раціональне використання об’єму вакуумної камери, спрощення конструкції апарату.

На рис. 4.11 представлено креслення вакуумної камери, призначеної для групового охолодження порції батонів.

Моделювання відбувалося в середовищі SolidWorks, відповідно до результату аналізу вакуумної камери маса такої компоновки складає 8,27 кг.

Визначимо об'єм вакуумних камер та необхідну продуктивність вакуумного насосу при використанні такої компоновки.

Об'єм одної вакуумної камери буде складатись з об'єму паралелепіпеда та об'єму циліндра (формула 66)::

$$V_k = 0.0151 + 0,000149 = 0,0152 \text{ м}^3$$

де:

V_n – об'єм паралелепіпеда (формула 67)::

$$V_n = 0,51 \cdot 0,33 \cdot 0,09 = 0.0151 \text{ м}^3$$

$V_{ц}$ – об'єм циліндра (формула 68)::

$$V_{ц} = \pi \cdot 0,03^2 \cdot 0,053 = 0,000149 \text{ м}^3$$

Необхідна продуктивність вакуумного насосу при використанні вакуумних камер призначених для парного охолодження кожного батона в складі порції [1] (формула 69...71)::

$$V_{\text{заг}} = (0,0152 \cdot 6) + (0,2 \cdot 24) = 4,89 \text{ м}^3$$

$$S = \frac{4,89}{66} \cdot \ln \frac{101325}{4000} \cdot 2.5 = 0,59 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$S_{\text{год}} = 0,59 \cdot 3600 = 2124 \text{ м}^3/\text{год}$$

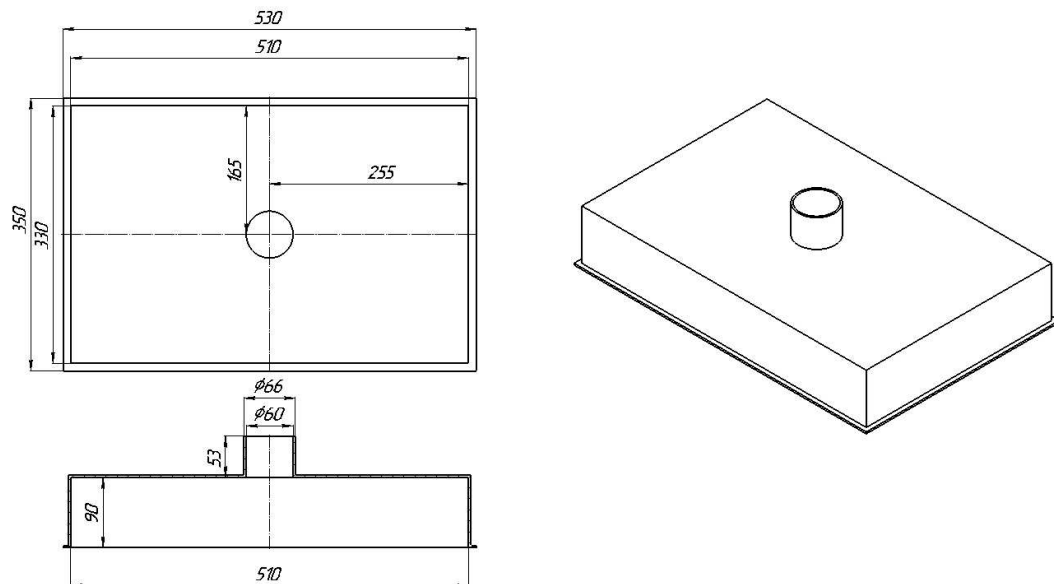


Рис. 4.11. Креслення вакуумної камери призначеної для групового охолодження порції батонів

В таблиці 4.3 наведено порівняльну характеристику запропонованих компоновок вакуумних камер – індивідуальної, парної та групової. Оцінювання здійснювалось за

такими критеріями, як металоємність, об'єм, необхідна продуктивність вакуумного насосу.

Таблиця 4.3

Порівняльну характеристику запропонованих компонок вакуумних камер

Характеристика	Індивідуальні камери для кожного батона	Парне охолодження батонів	Групове охолодження
Загальна маса (кг)	94,8	69,6	49,62
Загальний об'єм (м ³)	0,109	0,101	0,0912
Необхідна продуктивність вакуумного насоса (м ³ /год)	2162	2162	2124

Проведений аналіз трьох варіантів конфігурації вакуумних камер – індивідуального, парного та групового охолодження батонів – показав, що з конструктивної, технологічної та енергетичної точки зору найбільш доцільним для умов потокового виробництва є групове охолодження.

Хоча індивідуальні та парні камери забезпечують більшу гнучкість у керуванні процесом охолодження, вони мають суттєві недоліки: збільшена маса конструкції, ускладнена система підключення до вакууму, зростання металоємності та складність технічного обслуговування. Відповідно до розрахунків, групова компоновка забезпечує найменшу масу вакуумних камер, найменший загальний об'єм та дещо нижчу необхідну продуктивність вакуумного насоса що свідчить про її ефективність.

Таким чином, групове охолодження порції з 4 батонів у єдиній вакуумній камері забезпечує оптимальне поєднання енергоефективності, простоти конструкції, узгодженості з ритмом технологічного процесу та достатньої точності керування охолодженням. Такий підхід рекомендовано прийняти як раціональний варіант компоновки вакуумної камери апарата для охолодження хлібобулочних виробів.

4.5 Визначення площі контакту вакуумної камери з ущільненням

Вибір матеріалу ущільнення

Оскільки хлібобулочні вироби контактуватимуть з внутрішніми поверхнями камери або впливати на матеріали через виділення гарячої пари, всі матеріали повинні відповідати стандартам харчової безпеки, не виділяти шкідливих речовин і бути стійкими до корозії в умовах високої вологості [3]. На початку процесу температура м'якушки становить 98...100 °С, а скоринки – близько 160 °С, тому обрані матеріали повинні витримувати такі температурні навантаження без деформації, втрати герметичності та виділення шкідливих речовин. Ущільнювальні матеріали також повинні зберігати свої властивості в умовах високої температури та вологості [1, 3].

У вакуумних системах як ущільнення часто використовуються матеріали, що поєднують у собі високу герметичність, стійкість до температурних і хімічних впливів і відповідність стандартам харчової безпеки. Найпоширенішими серед них є силіконова гума, фторопласт (ФКМ) і EPDM (етиленпропілендієновий каучук). EPDM з твердістю 60 дюрометрів є популярним матеріалом для вакуумних систем у харчовій промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Ця твердість забезпечує оптимальний баланс між жорсткістю та гнучкістю, що робить цей матеріал придатним для використання в ущільненнях, прокладках та інших елементах, які вимагають стійкості до стиснення та тривалого контакту з вологим середовищем. EPDM витримує температурний діапазон від –40 °С до +120 °С, а при короткочасному використанні до +170 °С, що важливо для процесів з великими температурними коливаннями. Цей матеріал стійкий до кислот, лугів, води, пари та озону, що робить його хорошим вибором для застосування, пов'язаного з хімічною обробкою або впливом вологого середовища. При мінімальному водопоглинанні EPDM забезпечує тривалу герметичність у вакуумних системах навіть при тривалому контакті з рідинами. Важливою властивістю EPDM є його стійкість до ультрафіолету та озону, що забезпечує тривалу експлуатацію на повітрі або відкритому середовищі. EPDM відповідає міжнародним стандартам, таким як FDA (США) і європейським нормам, що дозволяє використовувати його у виробництві харчових продуктів без будь-яких

ризиків для безпеки. Завдяки цим характеристикам EPDM з твердістю 60 дюрометрів є надійним і універсальним вибором для вакуумних ущільнювачів, які працюють у складних умовах харчового виробництва.

Визначення площі контакту

Для забезпечення ефективної роботи вузла вакуумування і довговічності його роботи необхідно правильно підібрати площу контакту вакуумної камери з ущільненням. Для цього був зроблений розрахунок, щоб уникнути руйнування гуми і забезпечити належний рівень герметичності в системі [1].

В якості матеріалу для ущільнення ми використовуємо гуму EPDM 50-60 Shore A, оскільки вона має відповідні характеристики, які забезпечують високу міцність на стиск і підходить для умов вакуумного охолодження.

Враховуючи що у вакуумній камері буде створюватись розрідження до 4 кПа на вакуумну камеру і відповідно на ущільнення буде діяти зовнішній тиск 97,352 кПа виконано розрахунок необхідної площу контакту ущільнення з вакуумною камерою

Розрахунок проводиться за формулою напруги стиску [3]:

$$\sigma_c = \frac{P}{F} \quad (72)$$

де:

σ_c — напруження (Па),

P — сила стискання (Н),

F — площа поперечного перерізу (м²).

Звідси:

$$F = \frac{P}{\sigma_c} \quad (73)$$

Межу міцності на стиск приймаємо $[\sigma_c] = 5 \text{ МПа} = 5000000 \text{ Па}$, оскільки коефіцієнт запасу міцності (КЗМ) для еластомерів, таких як EPDM (етилен-пропіленовий каучук), може варіюватися в залежності від конкретних умов експлуатації, включаючи температуру, навантаження та тривалість впливу зазвичай коливається в межах від 2 до 4 то межа міцності на стиск буде $\sigma_c = 5000000/2 = 2500000 \text{ Па}$

Розраховуємо площу контакту вакуумної камери з ущільненням:

$$F = \frac{97352}{2500000} = 0,0389 \text{ м}^2 \quad (74)$$

На рис. 4.12 зображено область контакту вакуумної камери з ущільненням враховуючи необхідні розміри для розміщення в середині 4 батонів.

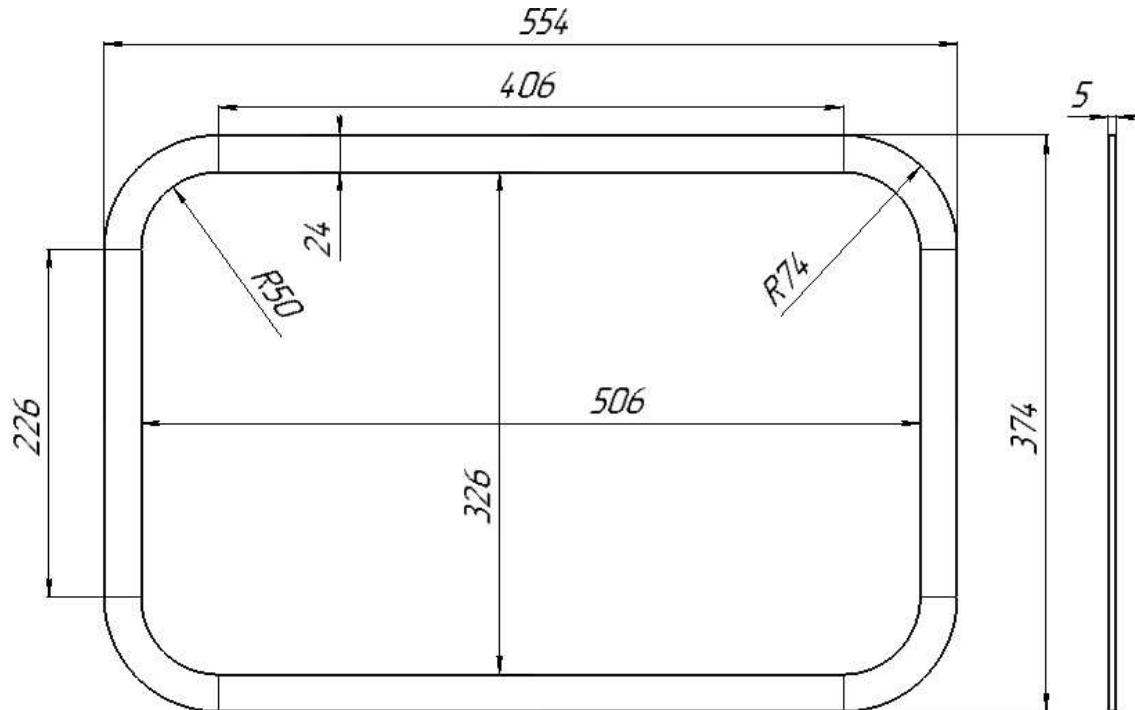


Рис. 4.12. Область контакту вакуумної камери з ущільненням

Розрахуємо площу поверхні п'ятна контакту вакуумної камери з ущільненням:

$$F_1 = (0.406 \cdot 0.024) \cdot 2 = 0,019488 \text{ м}^2$$

$$F_2 = (0.23 \cdot 0.01) \cdot 2 = 0,010848 \text{ м}^2 \quad (75)$$

$$F_3 = (\pi \cdot 0,06^2) - (\pi \cdot 0,05^2) = 0,009345 \text{ м}^2 \quad (76)$$

$$F = 0.019488 + 0,010848 + 0,009345 = 0,039681 \text{ м}^2 \quad (77)$$

Проводимо перевірку розрахунків гуми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS, креслення гуми наведено на рис. 4.13.

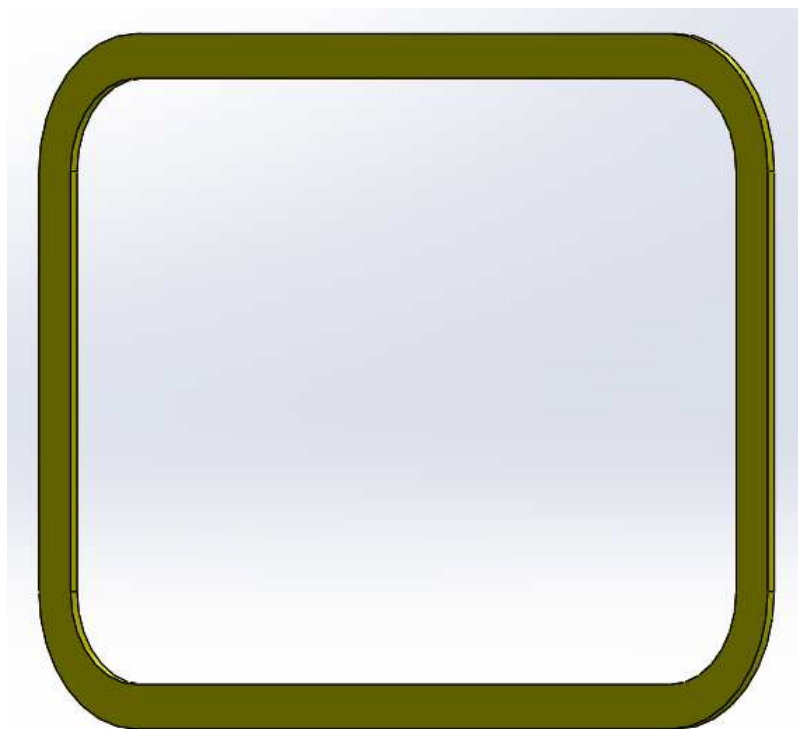


Рис.4.13. 3Д креслення профіля гуми над яким проводилися моделювання.

На рис. 4.14 зображено схему прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS.

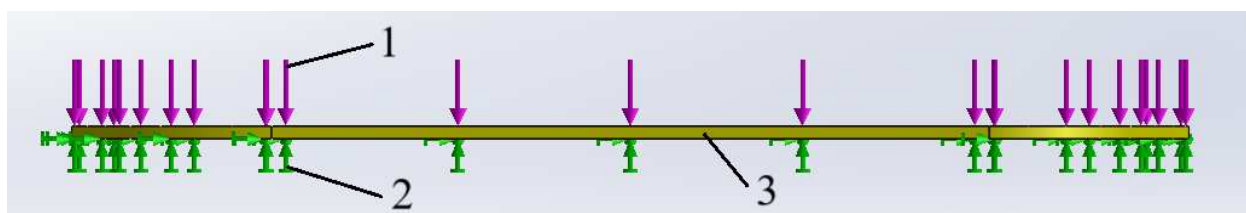


Рис. 4.14. Схема прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS:

1 – зображення прикладеного навантаження в 97325 Па; 2 – зображення жорсткої фіксації площини в просторі; 3 – профіль вакуумної гуми EPDM

Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 4.15.

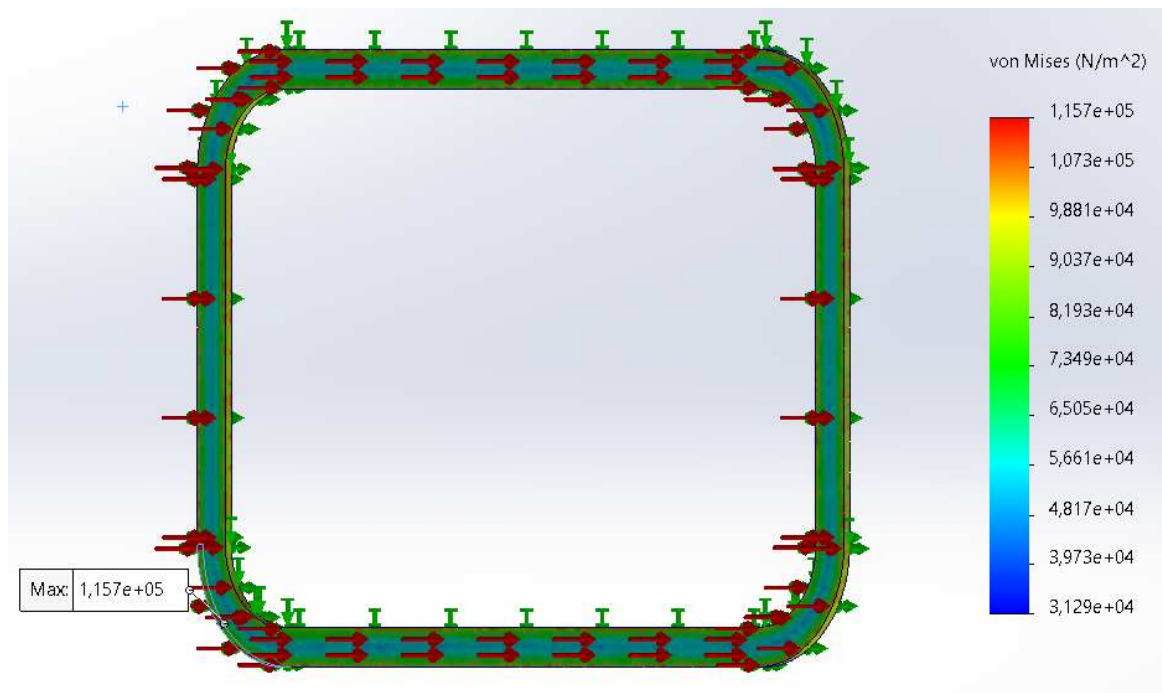


Рис. 4.15. Результати перевірки розрахунків гуми EPDM на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

За результатами проведеного моделювання максимальне навантаження становить $\sigma_{max} = 1,157 \cdot 10^5$ Па перевіряємо умову міцності матеріалу:

$$\sigma_c \geq \sigma_{max} - 2,5 \cdot 10^6 > 1,157 \cdot 10^5 - \text{Умова міцності виконується.}$$

Обрана марка гуми, розрахована площа контакту та розроблена 3Д модель ущільнення задовольняють умови експлуатації.

4.6 Визначення раціональних конструктивних параметрів вакуумної камери

Марка сталі яка використовується для виготовлення вакуумної камери AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2).

Враховуючи геометричні параметри п'ятна контакту вакуумної камери з ущільненням визначимо оптимальну будову вакуумної камери шляхом проведення перевірки на міцність та деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS [1].

На рис. 4.16 зображено креслення вакуумної камери простої форми

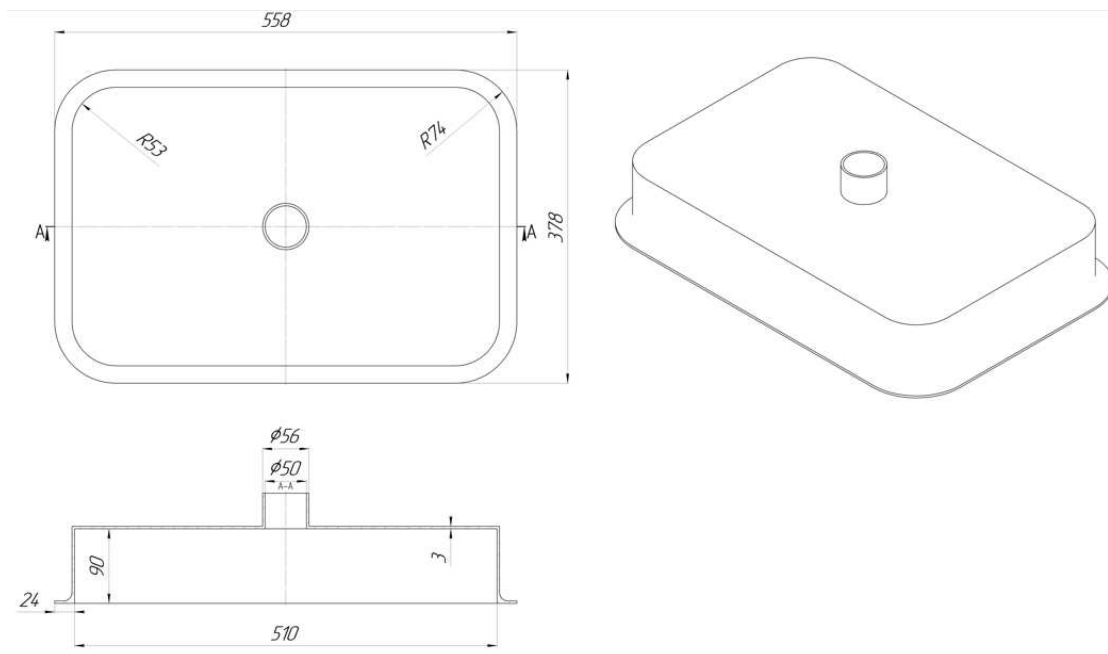


Рис. 4.16. Креслення вакуумної камери простої форми

З метою визначення критичних зон напруги та деформації проведемо дослідження в середовищі SOLIDWORKS Simulation.

Схема прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS зображено на рис 4.17.

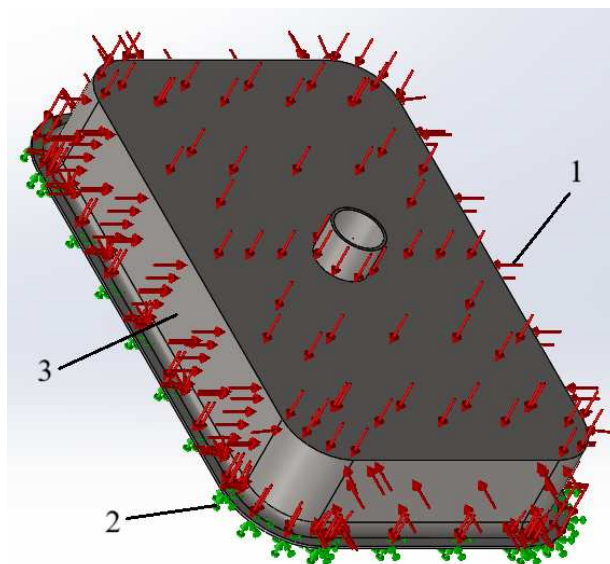


Рис. 4.17. Схема прикладення навантаження та фіксація моделі в просторі в середовищі SOLIDWORKS:

1 – зображення прикладеного навантаження в 97325 Па;

2 – зображення жорсткої фіксації площини в просторі: 3 – Вакуумна камера

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис. 4.18.

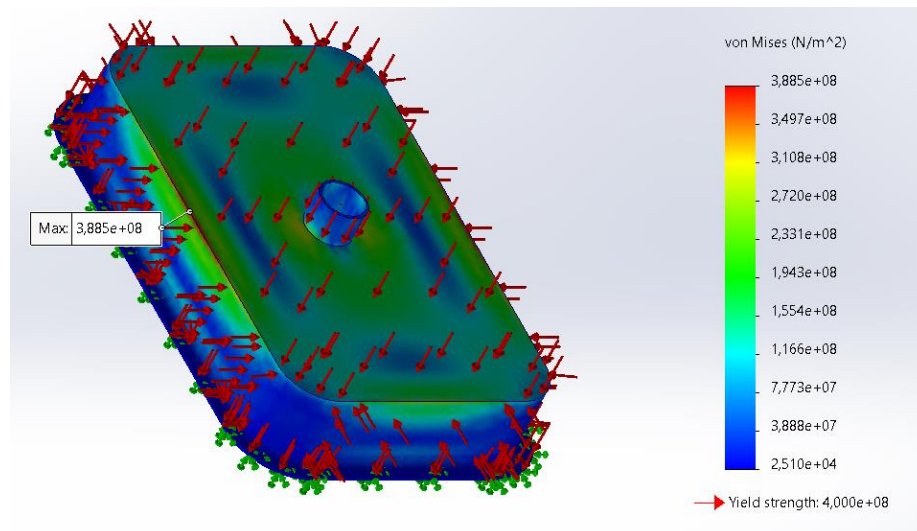


Рис. 4.18. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на міцність за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

За результатами проведеного моделювання (Рис 4.11.) максимальне навантаження становить $\sigma_{max} = 3,855 \cdot 10^8$ Па, перевіряємо умову міцності матеріалу:

$$\sigma_c \geq \sigma_{max} - 6 \cdot 10^8 > 3,855 \cdot 10^8 - \text{Умова міцності виконується}$$

Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS наведено на рис 4.19.

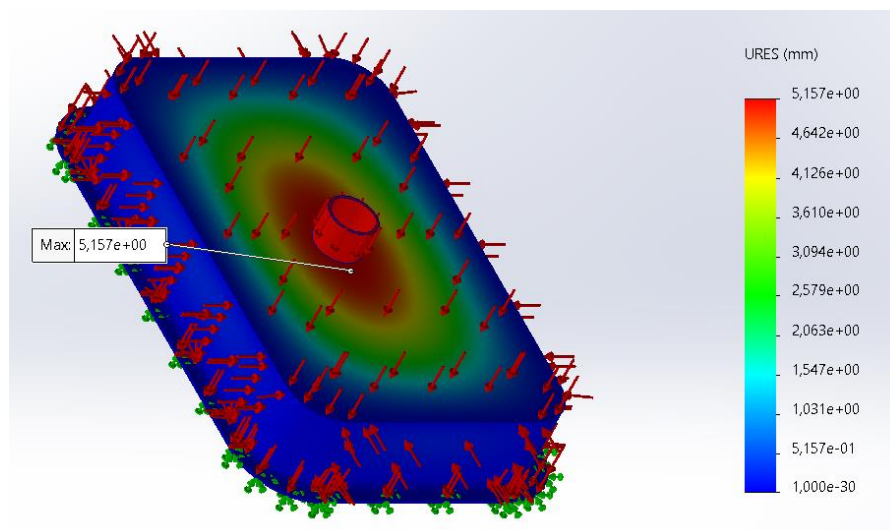


Рис. 4.19. Результати перевірки вакуумної камери простої форми на деформацію за допомогою моделювання в середовищі SOLIDWORKS

В зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм в результаті навантаження деформація складає 5,1 мм, отже залишкова висота складає 84,9 мм,

висота батона 80 мм, отже батон в процесі вакуумування не буде замінатися, але деформація на рівні 5,1 мм, що виникатиме за кожним циклом охолодження, негативно впливатиме на довговічність матеріалу, поступово знижуючи його експлуатаційні характеристики (рис. 4.12).

В результаті моделювання були визначені зони максимальних напруг і деформацій. Одним із шляхів усунення концентрації напруг і деформацій, а також збільшення жорсткості конструкції є наближення будови вакуумної камери до сферичної форми або додавання ребра жорсткості в місцях найбільшої деформації.

Наближення будови вакуумної камери до сферичної форми

На рис. 4.20 зображено 3Д моделі вакуум камер із радіусом заокруглення верхньої кромки 10, 20, 30, 40 та 50 мм.

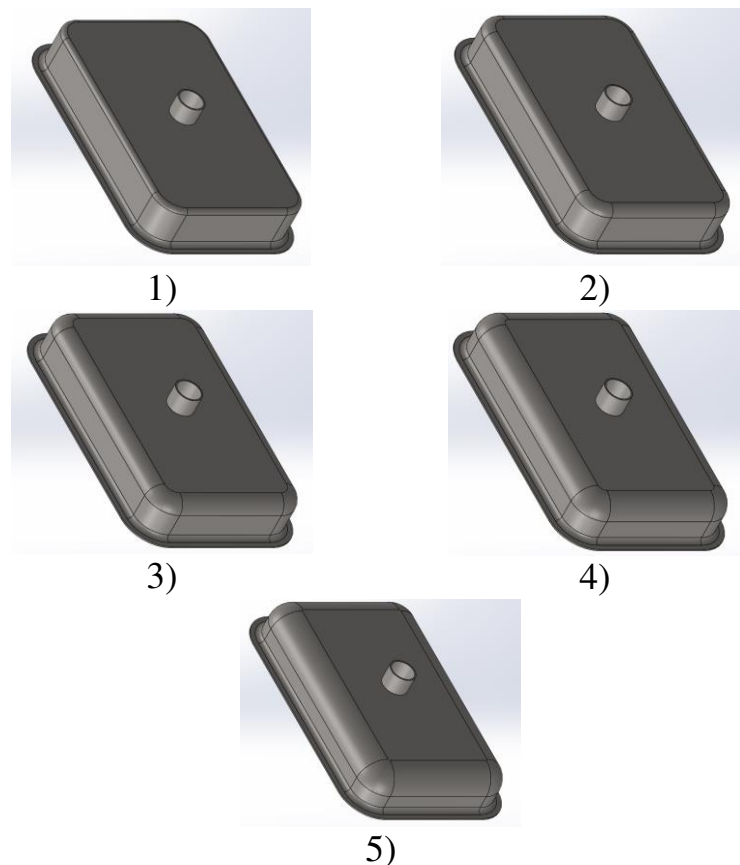


Рис. 4.20. 3Д моделі вакуумних камер із радіусом заокруглення верхньої кромки:

1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 50 мм

В результаті перевірки вакуумних камер з заокругленням верхньої кромки на міцність (рис. 4.21...4.25) максимальне напруження коливається в межах $\sigma_{max} =$

$2,099 \cdot 10^8 \dots 3,309 \cdot 10^8$ Па, найменше напруження у вакуумній камери з радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм.

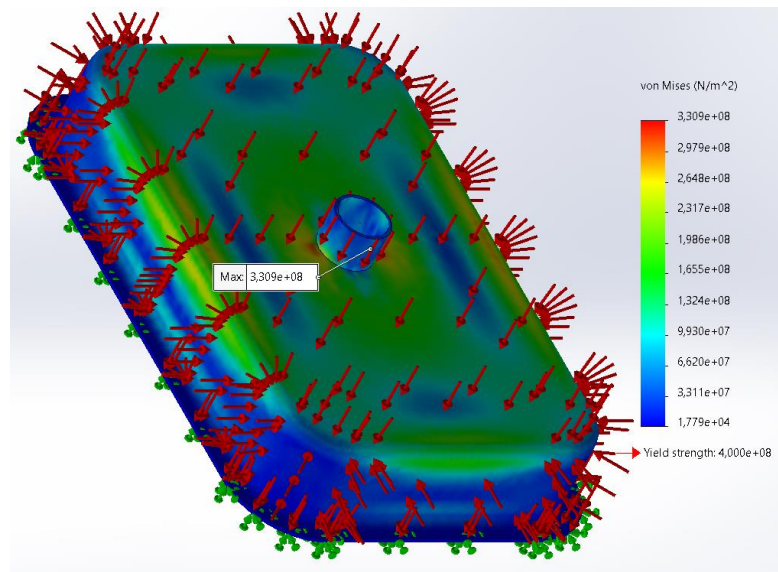


Рис. 4.21. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм.

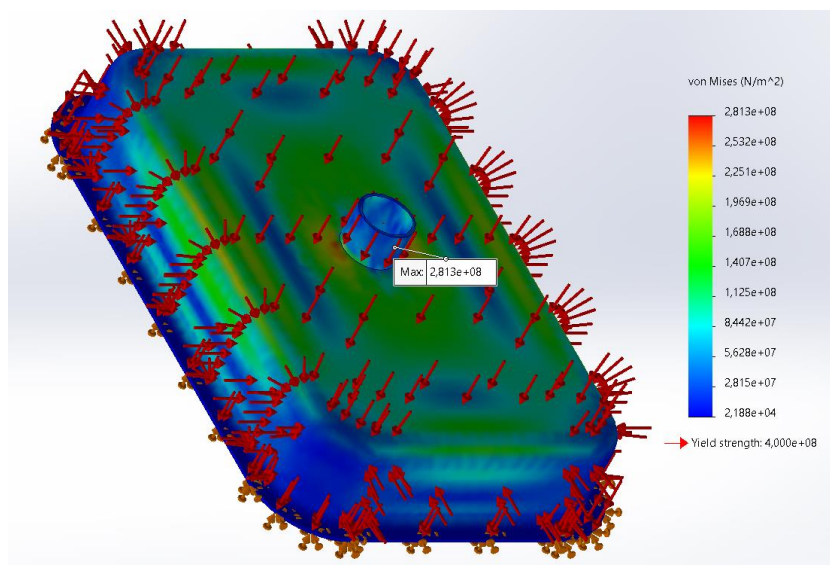


Рис. 4.22. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм.

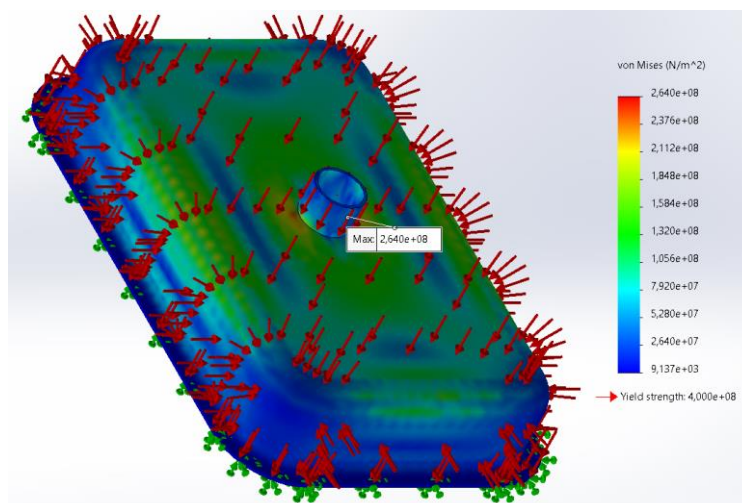


Рис. 4.23. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм.

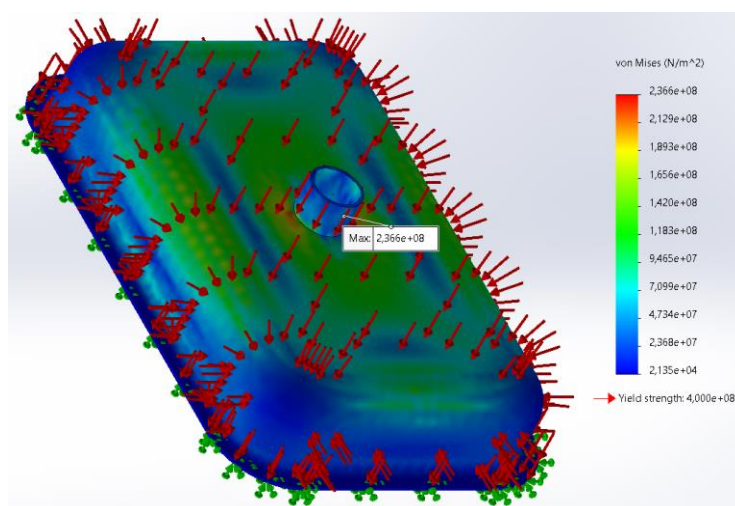


Рис. 4.24. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм.

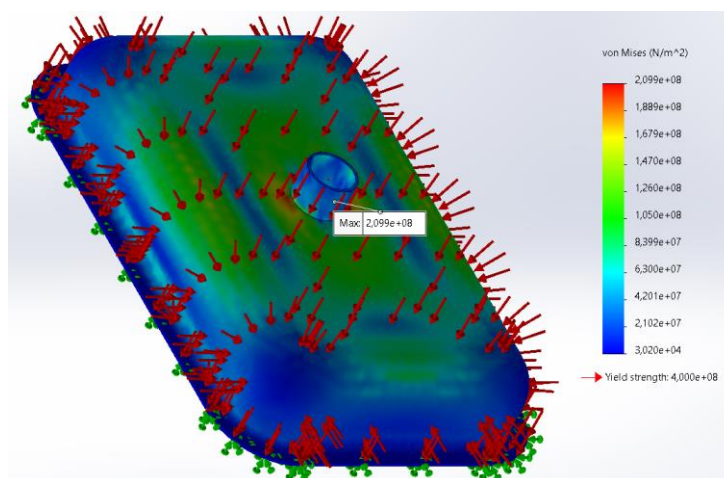


Рис. 4.25. Результати перевірки вакуумної камери на міцність із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм.

$\sigma_c \geq \sigma_{max} - 6 \cdot 10^9 > 3,309 \cdot 10^8 \dots 2,099 \cdot 10^8$ Па. – Умова міцності виконується в усіх варіантах конструкції.

В результаті перевірки вакуумних камер з заокругленням верхньої кромки на деформацію (рис. 4.26...4.30) максимальне значення коливається в межах 2,07 ...4,8 мм, найменша деформація у вакуумної камери з радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм.

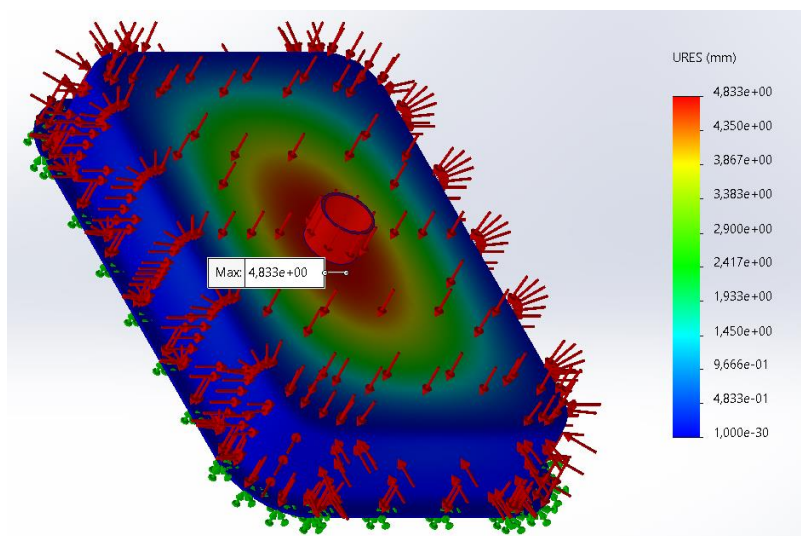


Рис. 4.26. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію із радіусом заокруглення верхньої кромки 10 мм.

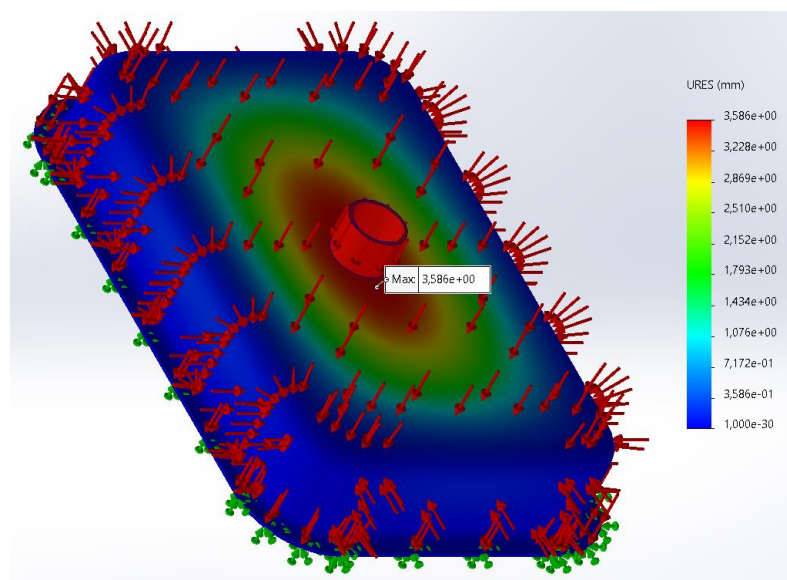


Рис. 4.27. Результати перевірки вакуумної камери на деформацію із радіусом заокруглення верхньої кромки 20 мм.

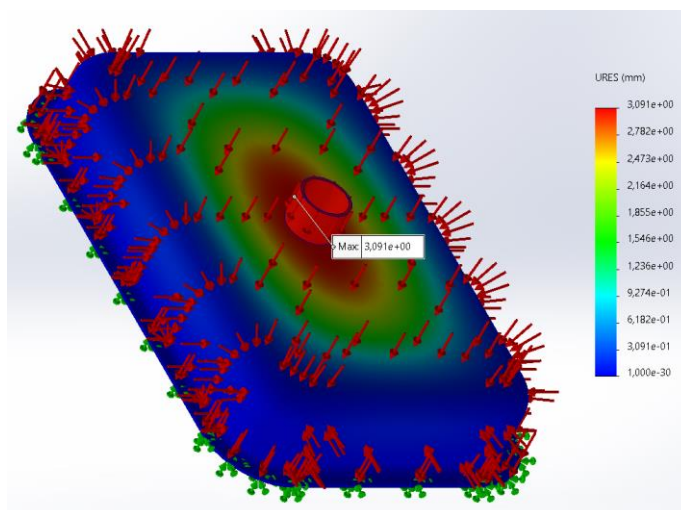


Рис. 4.28 Результати перевірки вакуумної камери на деформацію із радіусом заокруглення верхньої кромки 30 мм.

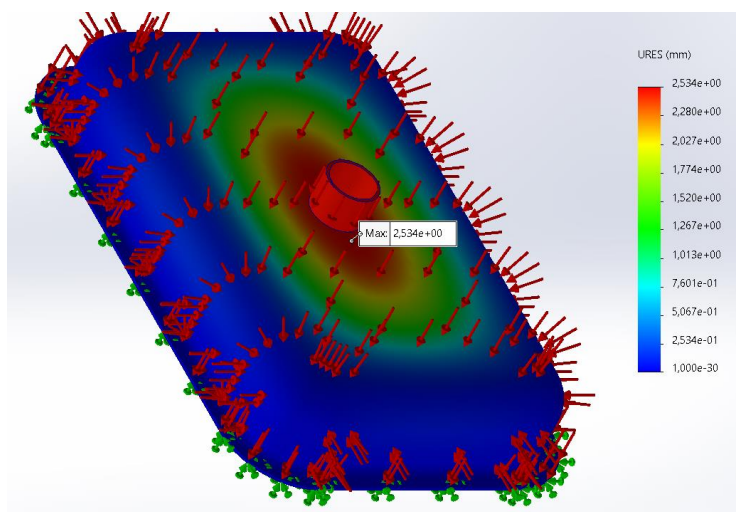


Рис. 4.29 Результати перевірки вакуумної камери на деформацію із радіусом заокруглення верхньої кромки 40 мм.

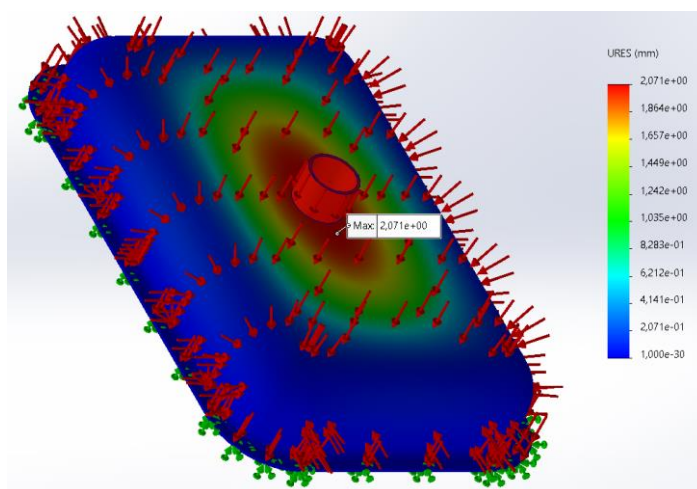


Рис. 4.30 Результати перевірки вакуумної камери на деформацію із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм.

Заокруглення верхньої кромки вакуумної камери радіусом 50 мм дозволило зменшити деформацію, що виникає в результаті зовнішнього тиску, з 5,1 мм до 2,07 мм. Подальше збільшення радіусу заокруглення є недоцільним, оскільки це збільшує ризик пошкодження продукту всередині.

Додавання ребра жорсткості в місцях найбільшої деформації

На рис. 4.31 зображено 3Д моделі вакуумних камер із додаванням ребра жорсткості різної конфігурації: висотою 5 мм шириною 3 мм; висотою 10 мм шириною 3 мм; висотою 15 мм шириною 3 мм;

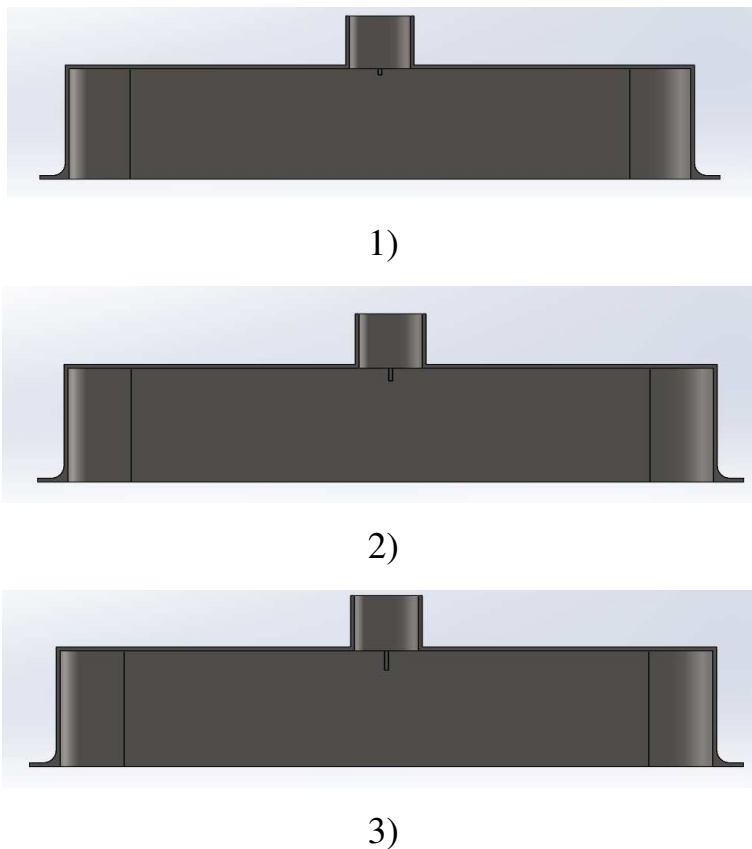


Рис. 4.31. 3Д моделі вакуумних камер із додаванням ребра жорсткості різної конфігурації:

1) висота 5 мм ширина 3 мм; 2) висота 10 мм ширина 3 мм;

3) висота 15 мм ширина 3 мм;

В результаті перевірки вакуумних камер з додаванням ребра жорсткості на міцність (рис. 4.32...4.34) максимальне напруження коливається в межах $\sigma_{max} = 5,342 \cdot 10^8 \dots 7,527 \cdot 10^8$ Па, найменше напруження у вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм; Умова міцності не виконується у

вакуумної камери ребром жорсткості висотою 5 і 10 мм шириною 3 мм $\sigma_c < \sigma_{max} 6 \cdot 10^8 < 6.869 \cdot 10^8 \dots 7,527 \cdot 10^8$ Па, відбувається руйнування ребра жорсткості

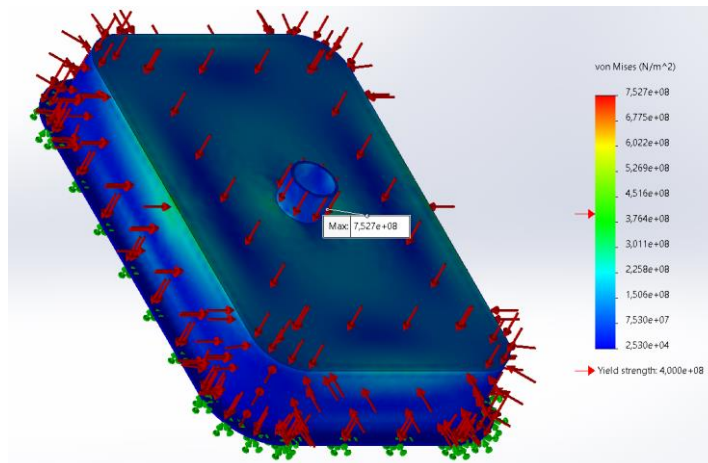


Рис. 4.32. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 5 мм шириною 3 мм на міцність;

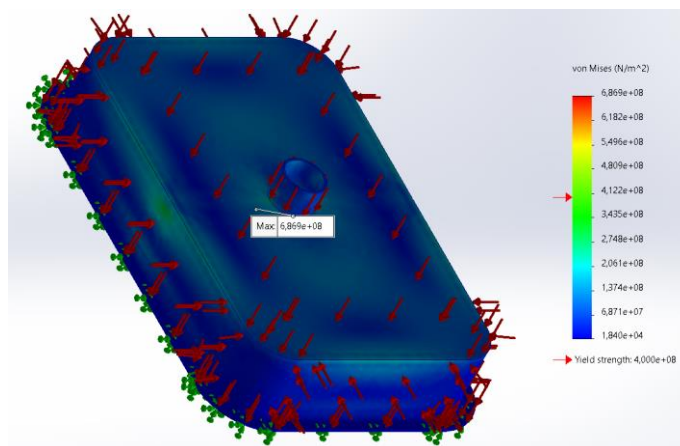


Рис. 4.33. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 10 мм шириною 3 мм на міцність;

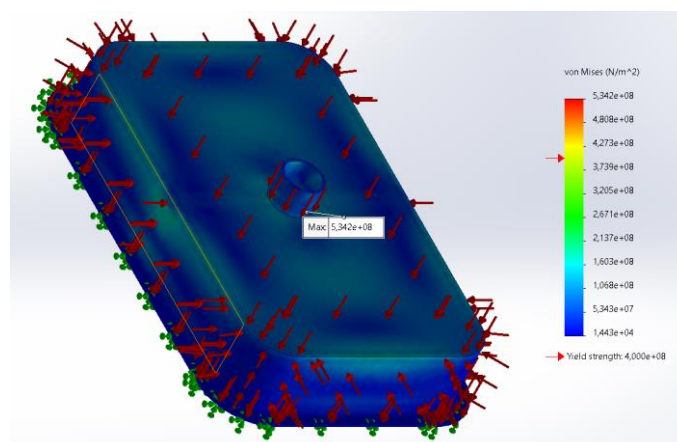


Рис. 4.34. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на міцність;

В результаті перевірки вакуумних камер з додаванням ребра жорсткості на деформацію (рис. 4.35...4.37) максимальне значення коливається в межах 2,3...4,2 мм, найменша деформація у вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм;

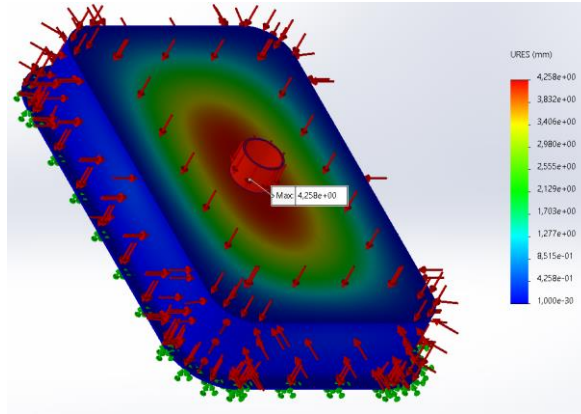


Рис. 4.35. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 5 мм шириною 3 мм на деформацію;

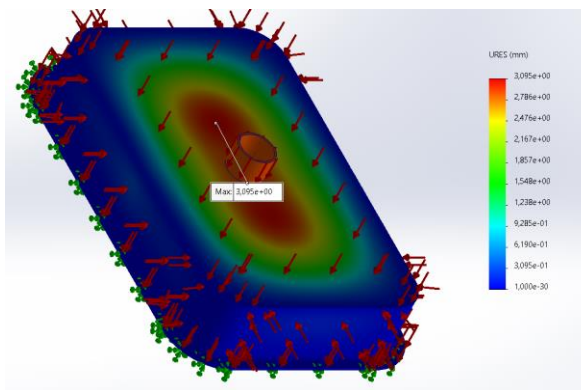


Рис. 4.36. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 10 мм шириною 3 мм на деформацію;

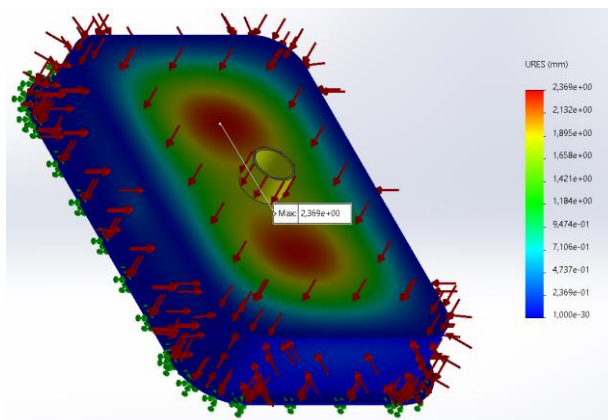


Рис. 4.37. Результати перевірки вакуумної камери з ребром жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на деформацію;

Враховуючи зони максимальної деформації було прийнято розробити будову вакуумної камери з трьома ребрами жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм (рис. 4.38)

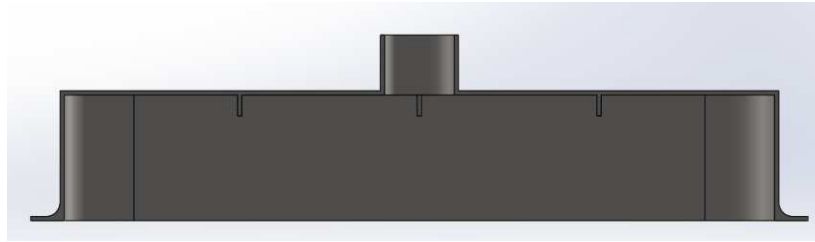


Рис. 4.38. Вакуумна камера з трьома ребрами жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм

В результаті перевірки вакуумної камери з трьома ребрами жорсткості на міцність та деформацію визначено що: максимальне напруження (рис. 4.39) становить $\sigma_{max} = 3.5 \cdot 10^8$ Па, максимальна деформація становить (рис. 4.40) 1,28 мм.

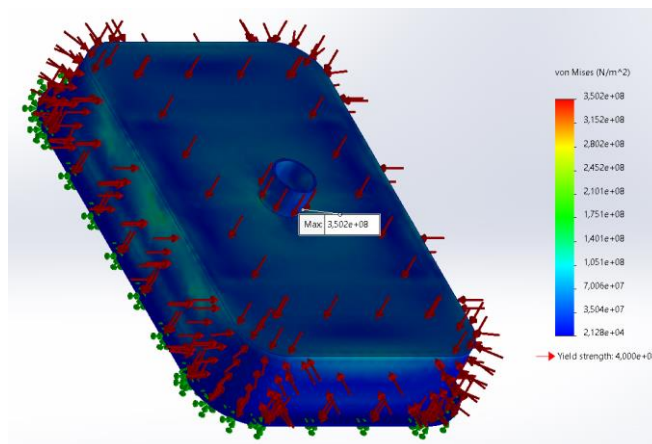


Рис. 4.39. Результати перевірки вакуумної камери з трьома ребрами жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на міцність

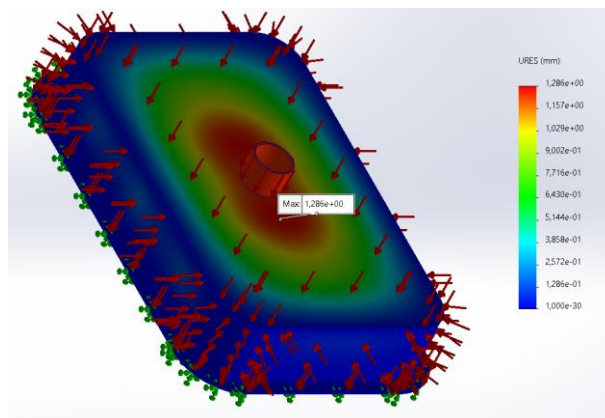


Рис. 4.40. Результати перевірки вакуумної камери з трьома ребрами жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на деформацію

Рациональна будова вакуумної камери

Опираючись на результати перевірки вакуумних камер із заокругленням верхньої кромки та вакуумних камер з додаванням ребра жорсткості було прийнято рішення побудувати вакуумну камеру із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм (рис. 4.41)

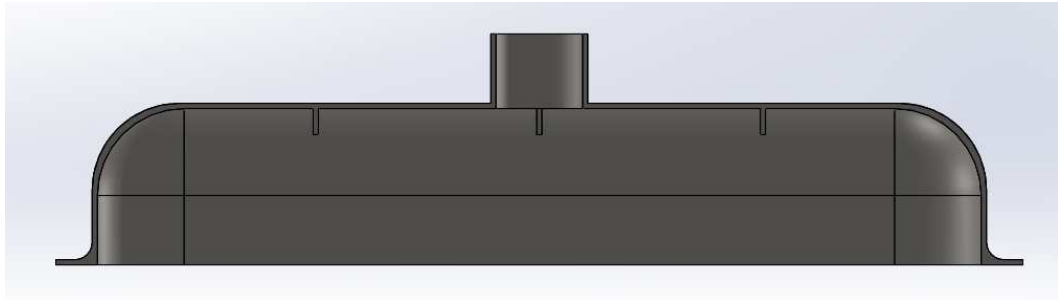


Рис. 4.41. Вакуумна камера із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм

В результаті перевірки вакуумної камери із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на міцність та деформацію визначено що: максимальне напруження (рис. 4.42) становить $\sigma_{max} = 2,38 \cdot 10^8$ Па, максимальна деформація становить (рис. 4.43) 0,7мм.

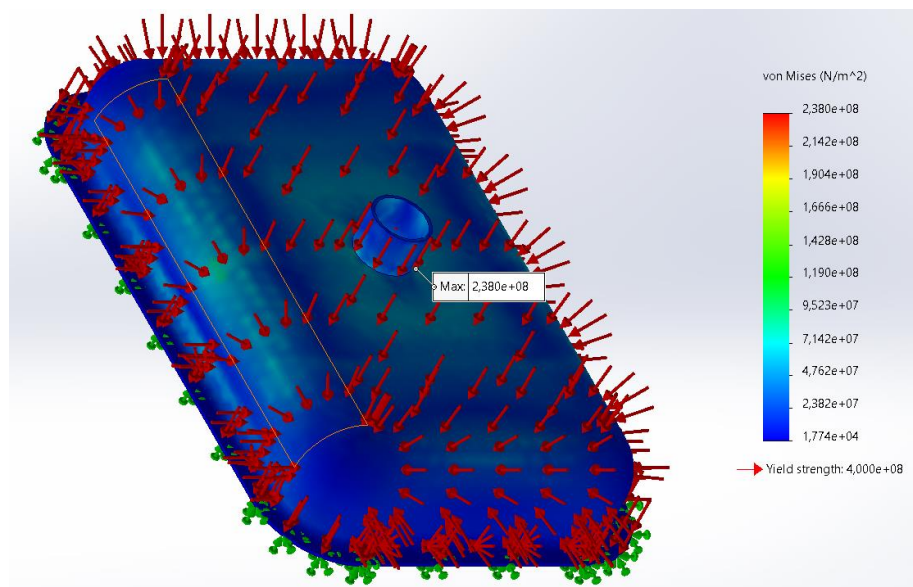


Рис. 4.42. Результати перевірки вакуумної камери із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на міцність

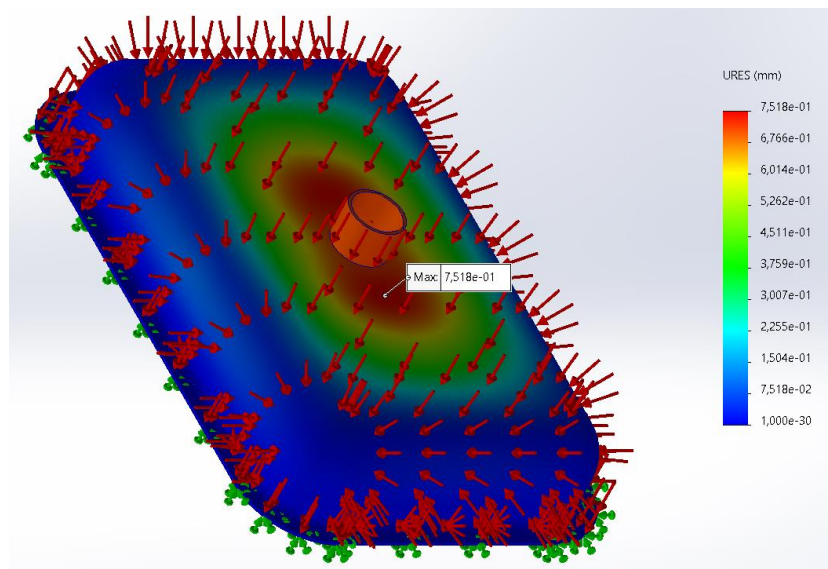


Рис. 4.43. Результати перевірки вакуумної камери із радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм на деформацію

У зоні найбільшої деформації висота камери складає 90 мм. В результаті моделювання деформація становить 0,7 мм, тому залишкова висота камери дорівнює 89,3 мм. Оскільки висота батона складає 80 мм, батон під час вакуумування не буде заминатися. При такій конструкції деформація є мінімальною, що дозволяє зробити висновок, що будова вакуумної камери задовольняє умови експлуатації.

В таблиці 4.4 зведено результати досліджень з визначення раціональної будови вакуумної камери яка буде відповідати умовам експлуатації.

У результаті досліджень, проведених у середовищі SOLIDWORKS Simulation, були визначені основні параметри, що впливають на міцність і деформацію вакуумної камери в умовах розрідження, необхідного для охолодження батона вагою 0,5 кг від температури 100 °С до 30 °С. Враховано вплив необхідного рівня розрідження на конструкцію камери, зокрема розподіл напружень і можливі деформації матеріалу в процесі охолодження.

Основними параметрами, які враховувалися під час моделювання, є тиск у вакуумній камері, геометрія камери та її матеріал. Розрахунки показали, що важливу роль у забезпеченні герметичності та міцності вакуумної камери відіграє її форма, а також використовуваний для виготовлення камери матеріал, які повинні витримувати тиск, що виникає при створенні розрідження.

Результати досліджень з визначення раціональної будови вакуумної камери

Параметр	Напруження Па	Деформація мм	Відповідність умовам експлуатації
Проста форма	$3,855 \cdot 10^8$	5,7	Не відповідає, велике значення деформації
Радіус заокруглення верхньої кромки 10 мм.	$3,309 \cdot 10^8$	4,8	Не відповідає, велике значення деформації
Радіус заокруглення верхньої кромки 20 мм.	$2,813 \cdot 10^8$	3,58	Не відповідає, велике значення деформації
Радіус заокруглення верхньої кромки 30 мм.	$2,64 \cdot 10^8$	3,09	Не відповідає, велике значення деформації
Радіус заокруглення верхньої кромки 40 мм.	$2,366 \cdot 10^8$	2,53	Не відповідає, велике значення деформації
Радіус заокруглення верхньої кромки 50 мм.	$2,099 \cdot 10^8$	2,07	Не відповідає, велике значення деформації
Додавання ребра жорсткості висотою 5 мм шириною 3 мм	$7,527 \cdot 10^8$	4.2	Не відповідає, відбувається руйнування ребра жорсткості
Додавання ребра жорсткості висотою 10 мм шириною 3 мм	$6,869 \cdot 10^8$	3.095	Не відповідає, відбувається руйнування ребра жорсткості
Додавання ребра жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм	$5,342 \cdot 10^8$	2,369	Не відповідає, велике значення деформації
Додавання трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3мм	$3.5 \cdot 10^8$	1,28	Не відповідає, необхідне зменшення вільних об'ємів
Радіус заокруглення верхньої кромки 50 мм та додаванням трьох ребер жорсткості висотою 15 мм шириною 3 мм	$2,38 \cdot 10^8$	0,7	Відповідає

Завдяки використанню програмного забезпечення SOLIDWORKS Simulation ми змогли провести детальний аналіз, який дозволив оптимізувати конструкцію вакуумної камери для забезпечення її стабільної роботи в умовах розрідження. Зокрема, були оцінені всі критичні точки напруги, які можуть призвести до деформації або навіть руйнування камери при досягненні необхідного розрідження [56].

За результатами чисельного моделювання розроблено конструкцію вакуумної камери, яка відповідає всім експлуатаційним вимогам і дозволяє підтримувати герметичність вузла вакуумування. Камера розрахована на те, щоб витримувати значні перепади тиску без втрати герметичності та забезпечити належний рівень ефективності при вакуумному охолодженні хлібобулочних виробів.

4.7 Визначення закону руху батону в апараті для вакуумного охолодження хліба

Організація раціонального переміщення батону в апараті для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва є важливою для складовою для забезпечення цілісності продукції, синхронізації роботи виконавчих механізмів та досягнення високої продуктивності в умовах потокового виробництва. З огляду на це необхідно розробити аналітичний опис переміщення батону по всіх етапах його проходження через апарат – від моменту виходу з печі до розвантаження після охолодження. Такий опис дозволяє визначити оптимальні параметри роботи механізмів подачі, транспортування і фіксації, уникнути різких прискорень, зіткнень та перевантажень. Закономірності руху представлені у вигляді кусково-неперервної функції, що описує координату положення виробу як функцію часу протягом усього циклу.

Рух батона від моменту виходу з печі до повного завершення циклу вакуумного охолодження та вивантаження включає послідовність кінематично відмінних етапів [1]. Кожен з них має чітко визначену тривалість і характер руху, що дає змогу описати загальний закон переміщення виробу у вигляді кускової функції [3].

Етапи переміщення батону в апараті для вакуумного охолодження хліба:

1. Сковзання по приймальній гірці.

Батон рухається по похилій гірці під дією сили тяжіння. Відсутність початкової швидкості та сталий нахил дозволяє використати рівняння рівноприскореного руху [1, 3]:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (78)$$

де:

t – локальний час усередині кожної фази руху;

a – прискорення.

Знаючи довжину гірки $l = 400$ мм та час $t = 1$ с, визначаємо прискорення:

$$a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \cdot 0,4}{1^2} = 0,8 \text{ м/с}^2 \quad (79)$$

Закон переміщення на цьому етапі:

$$s_1(t) = 400 \cdot t^2, \quad t \in [0; 1] \quad (80)$$

2. Переміщення по накопичувальному конвеєрі.

Рух здійснюється поштовхами – по 134 мм за 2 с із паузою 20 с. для плавного руху кожного етапу використовуємо гармонічну функцію, яка гарантує нульові швидкості на початку і в кінці руху:

$$s(t) = s_0 + \frac{l}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t - t_0)}{\tau} \right) \right) \quad (81)$$

де:

$l = 134$ мм – довжина одного переміщення;

$\tau = 2$ с – тривалість руху;

t_0 – початок кожного поштовху.

Початковий момент кожного поштовху:

$$t_{\text{поч}}^{(i)} = 1 + (i - 1) \cdot 22, \quad i = 1 \dots 4$$

Закон руху для кожного з чотирьох переміщень:

$$s_{2,i}(t) = s_{i-1} + \frac{134}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t - t_{\text{поч}}^{(i)})}{2} \right) \right), \quad t \in [t_{\text{поч}}^{(i)}; t_{\text{поч}}^{(i)} + 2] \quad (82)$$

3. Преміщення у вакуумну камеру.

Після накопичення батон переміщується на 610 мм за 4 с. Аналогічно використовуємо гармонічний закон руху формула (81) де $l = 610$ мм, $\tau = 4$ с, $t_0 = 89$ с:

$$s_3(t) = s_2^{(\text{кінц})} + \frac{610}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot (t - 89)}{4} \right) \right), \quad t \in [89; 93] \quad (83)$$

4. Етап охолодження.

На цьому етапі батон нерухолий на столику для вакуумування під час охолодження та розгерметизації впродовж $t = 77$ с, отже:

$$s(t) = const, t \in [93; 170] \quad (84)$$

5. Розвантаження батона після охолодження.

Після завершення процесу вакуумного охолодження батон розвантажується на 280 мм за 4 с. Використовуємо гармонічну формулу руху (93):

$$s_4(t) = s_3^{(кінц)} + \frac{280}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot (t-170)}{4}\right)\right), t \in [170; 174] \quad (85)$$

Загальним законом переміщення є кускова функція для всього процесу:

$$s(t) = \begin{cases} 400t^2, & t \in [0; 1] \\ s_{2,i}(t), & t \in [1 + 22(i-1); 1 + 22(i-1) + 2], i = 1 \dots 4 \\ s_3(t), & t \in [89; 93] \\ const, & t \in [93; 170] \\ s_4(t), & t \in [170; 174] \end{cases} \quad (86)$$

На рис. 4.44 представлено зміну координат $X(t)$ руху батону в апараті для вакуумного охолодження хліба.

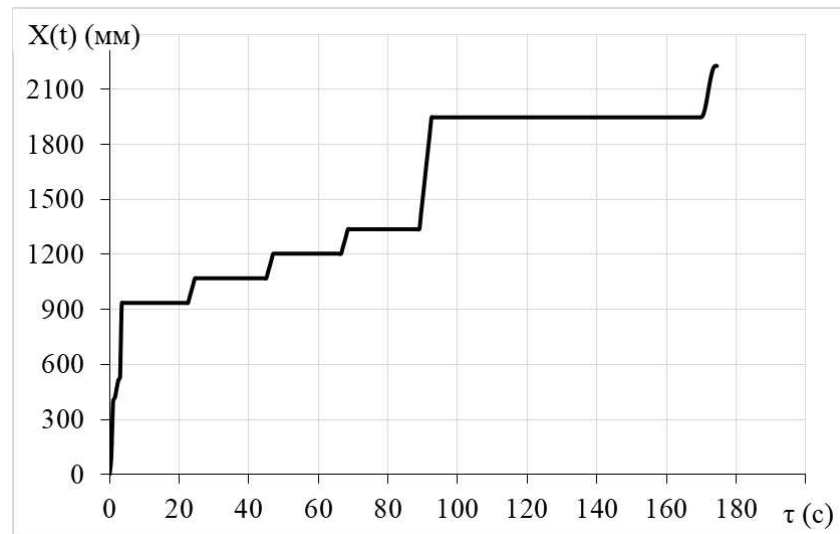


Рис. 4.44. Зміна координат $X(t)$ руху батону в апараті для вакуумного охолодження хліба.

Розроблений закон руху батону в апараті для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва забезпечить плавне переміщення без ризиків його пошкодження. Розроблений закон дозволяє знизити динамічні навантаження, та узгодити роботу механізмів [1]. Отримані залежності використані для подальшого розроблення циклограми роботи робочих органів апарата.

4.8 Висновки до розділу

В результаті проведених досліджень обґрунтовано конструктивні параметри апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва. На основі аналізу патентних рішень, параметрів виробничої лінії та моделювання окремих елементів конструкції сформовано технічно доцільну структуру апарата.

1. Встановлено, що найбільш раціональною є компоновка з роз'ємною вакуумною камерою групового охолодження, яка охоплює чотири батони в одній порції. До складу апарата входять приймальна гірка, накопичувальний конвеєр, завантажувальний механізм та розвантажувальний конвеєр, що забезпечують повну механізацію процесу та узгодженість з роботою тунельної печі.

2. Визначено кут нахилу приймальної гірки у 30° , який забезпечує самопливне переміщення батону без додаткових механізмів, що знижує енерговитрати та підвищує надійність системи.

3. Запропоновано синусоїдальний закон руху завантажувального механізму, що гарантує плавне переміщення виробів, знижує динамічні навантаження та ризик пошкодження продукції.

4. Розраховано і перевірено оптимальну площу контакту вакуумної камери з ущільненням із використанням гуми EPDM 60 Shore A. Проведено моделювання у середовищі SOLIDWORKS, яке підтвердило достатню міцність та герметичність конструкції.

5. Визначено, що раціональною формою вакуумної камери є конструкція з радіусом заокруглення верхньої кромки 50 мм та трьома ребрами жорсткості висотою 15 мм. Така конструкція забезпечує мінімальні деформації (0,7 мм) і відповідає всім умовам експлуатації.

6. Побудовано аналітичний закон руху батону в апараті, що охоплює всі етапи процесу — від приймання виробу з печі до його розвантаження після охолодження. Це дозволяє синхронізувати роботу всіх механізмів апарата та забезпечити стабільний ритм роботи у складі потокової лінії.

Обґрунтовані параметри та конструктивні рішення забезпечують ефективну роботу апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва.

РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

5.1 Розроблені рекомендації щодо режимних параметрів для проведення процесу вакуумного охолодження батону в умовах потокового виробництва

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також розрахунків розроблено рекомендації щодо режимних параметрів процесу вакуумного охолодження батона масою 0,5 кг з початковою температурою 100 °С до кінцевої температури 30 °С, котрі забезпечують ефективне охолодження, зберігши його якісні показники та виконати умови потокового виробництва [17]. Оптимальний температурний режим передбачає зниження температури батона з 98...100 °С до 30 °С за рахунок контрольованого відведення тепла через випаровування вологи (адіабатне кипіння вологи) [104]. Для забезпечення цього процесу тиск у вакуумній камері має знижуватись від атмосферного 101,325 кПа до 4 кПа зі швидкістю яка не перевищує 4,5 кПа/с, щоб уникнути надмірного перепаду тиску між внутрішнім середовищем в середині батона та середовищем вакуумної камери, що може спричинити пошкодження його структури, а саме розтріскування скоринки та відрив м'якушки. Оптимальний час охолодження становить 66 с. При цьому втрата маси батона на випаровування не повинна перевищувати 5...6 % вихідної маси, що забезпечується рівномірним зниженням тиску в вакуумній камері.

Швидкість випаровування вологи повинна бути узгоджена зі швидкістю її виходу з батона, щоб запобігти руйнуванню структури м'якушки. Контрольована різниця тиску між внутрішнім і зовнішнім середовищем буханки змінюється лінійно відповідно до залежності зображених на рис. 3.10, що сприяє збереженню структури м'якушки. Важливо використовувати вакуумне обладнання з герметичною камерою, надійною системою регулювання тиску та низькою теплопровідністю стінок. У промислових умовах необхідно забезпечити циклічність процесу охолодження з інтеграцією вакуумного охолодження в загальний виробничий потік [18]. Застосування автоматизованих систем регулювання тиску, та часу дозволяє підвищити ефективність охолодження, забезпечити якість продукції та знизити витрати на електроенергію. Наведені рекомендації спрямовані на оптимізацію

процесу вакуумного охолодження батона в умовах потокового виробництва, збереження органолептичних властивостей, форми та маси.

5.2 Циклограма роботи апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва

Циклограма роботи обладнання забезпечує злагодженість технологічного процесу, безперебійну роботу та оптимізацію взаємодії між компонентами системи. Регламентує порядок дій, тривалість операцій і контроль таких параметрів, як температура, тиск і час, тощо що сприяє високій якості продукції, запобіганню поломок і ефективному використанню ресурсів [3].

У процесі вакуумного охолодження батони після випікання подаються на гірку з напрямними, потім на накопичувальний конвеєр для формування порції (4 батони). Завантажувальний механізм переміщає порцію на вакуумний стіл, після чого опускається вакуумна камера. Після відкривається клапан підведення вакууму, протягом 66 секунд у вакуумній камері створюється розрідження. Після завершення охолодження камеру розгерметизують, піднімають, і охолоджені батони стикаються до розвантажувальних конвеєрів за рахунок завантаження наступної порції, забезпечуючи безперервний процес виробництва [3].

Для побудови циклограми ми розділили апарат на робочі органи та прописали час спрацювання кожного робочого органу (рис. 5.1):

Р.О.1 – Вакуумний насос, постійно ввімкнений та підтримує відповідний рівень розрідження у системі вакуумування;

Р.О.2 - накопичувальний конвеєр з крокоміром, працює релейно, тобто відсутній робочий та холосий хід, робочий орган або увімкнений або вимкнений. Під час запуску обладнання перше спрацювання відбувається через 22 с. і вмикається на 2 с, наступні 3 увімкнення відбувається кожні 20 с. (відбувається накопичення першої порції з 4 батонів) час запуску апарата складає 90 с., апарат виходить на робочий режим - після простою в 1 с конвеєр вмикається на 4 с. (відбувається завантаження порції), кожен перший простій конвеєра після завантаження порції складає 15 с, після

ще 3 спрацювань конвеєра через кожні 20 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

Р.О.3 – пневмоциліндр для вертикального переміщення завантажувального механізму, має робочий та холостий хід, а також час витримки та простою. Під час запуску апарата час простою перед першим робочим ходом складає 90 с., робочий хід складає 1 с. час витримки 4 с. холостий хід складає 1 с., апарат виходить на робочий режим, подальший час простою в циклі становить 82 с., робочий хід складає 1 с. час витримки 4 с. холостий хід складає 1 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

Р.О.4 – пневмоциліндр для горизонтального переміщення завантажувального механізму, має робочий та холостий хід, а також час витримки та простою. Під час запуску апарата час простою перед першим робочим ходом складає 91 с., робочий хід складає 4 с. час витримки 1 с. холостий хід складає 4 с., апарат виходить на робочий режим, подальший час простою в циклі становить 79 с., робочий хід складає 4 с. час витримки 1 с. холостий хід складає 4 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

Р.О.5 - пневмоциліндри для опускання та підняття вакуумної камери має робочий та холостий хід, а також час витримки та простою. Під час запуску апарата час простою перед першим робочим ходом складає 100 с., робочий хід складає 2 с. час витримки 73 с. холостий хід складає 2 с., апарат виходить на робочий режим, подальший час простою в циклі становить 11 с., робочий хід складає 2 с. час витримки 73 с. холостий хід складає 2 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

Р.О.6 – клапан вакуумування, працює релейно, тобто відсутній робочий та холосий хід, робочий орган або увімкнений або вимкнений. Під час запуску час простою складає 102 с., час увімкнення складає 66 с., апарат виходить на робочий режим, подальші увімкнення відбуваються кожні 22 с., час увімкнення складає 66 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

Р.О.7 - клапан розгерметизації; працює релейно, тобто відсутній робочий та холосий хід, робочий орган або увімкнений або вимкнений. Під час запуску час

простою складає 168 с., час увімкнення складає 7 с., апарат виходить на робочий режим, подальші увімкнення відбуваються кожні 81 с., час увімкнення складає 7 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

P.O.8 - розвантажувальний конвеєр працює релейно, тобто відсутній робочий та холосий хід, робочий орган або увімкнений або вимкнений. Під час запуску час простою складає 91 с., час увімкнення складає 9 с., апарат виходить на робочий режим, подальші увімкнення відбуваються кожні 79 с., час увімкнення складає 9 с., цикл повторюється, час одного робочого циклу складає 88 с.

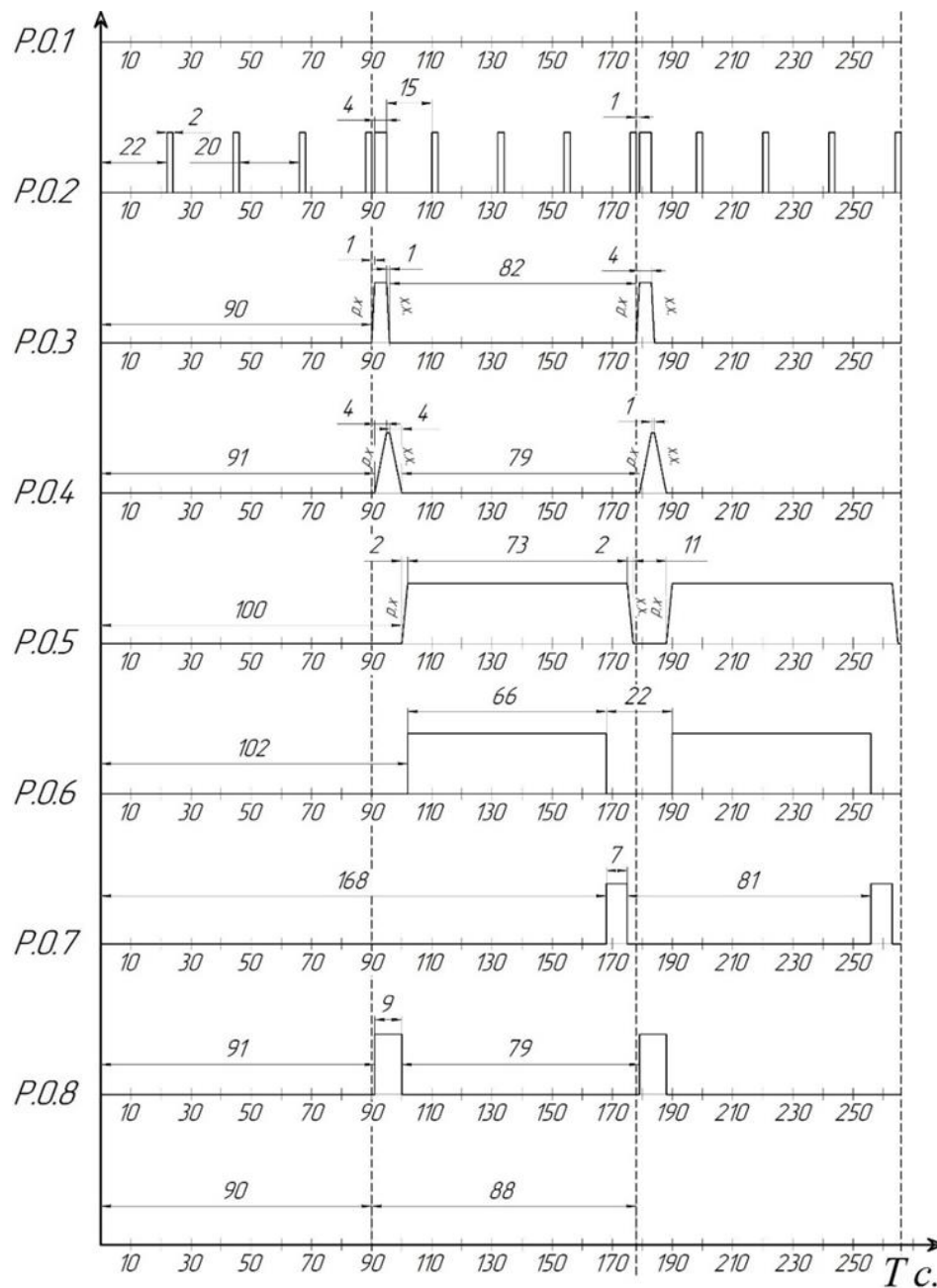


Рис. 5.1. Циклограма роботи апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва

Розроблена циклограма забезпечить узгоджену роботу Р.О. апарату, забезпечуючи безперервний цикл тривалістю 88 секунд. Вакуумний насос працює постійно, підтримуючи необхідний рівень розрідження в системі. Накопичувальний конвеєр зі направляючими формує порції батонів (по 4 шт.), забезпечуючи їх завантаження кожні 88 секунд. Пневмоциліндри керують вертикальним і горизонтальним переміщенням завантажувального механізму, а також опусканням і підйомом вакуумної камери з чітко визначеними фазами роботи і простою. Клапани вакуумування та розгерметизації працюють релейно, синхронізуючи процес охолодження та розгерметизації. Розвантажувальний конвеєр транспортує охолоджені батони через кожні 79 секунд після початку циклу. Така координація забезпечує ефективне використання ресурсів і безперебійність технологічного процесу [3].

5.3 Схема роботи пневмоприводів з електронним керуванням апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва

В апараті для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва використовуються пневмоприводи: Р.О.3, Р.О.4, Р.О.5 (рис. 5.3). У конструкції використано два типи пневмоциліндрів подвійної дії: безштокові (Р.О.4, Р.О.5), які забезпечують плавне і компактне переміщення в обмеженому просторі, і штокові (Р.О.3) [2].

Для забезпечення злагодженої та безперебійної роботи всіх вузлів було розроблено пневматичну схему, що враховує особливості роботи пневмоциліндрів, зокрема режимів їх перемикавання, синхронізацію руху а також швидкість робочих та холостих ходів. Крім того, передбачена електрична схема управління, яка забезпечує автоматизацію процесу, а також інтеграцію з системою управління апаратом.

На рис. 5.2 зображено принципову пневматичну схему підключення всіх елементів.

Електрична схема включає контролери, датчики положення штока, електромагнітні клапани та комунікаційні модулі. Це дозволяє задати оптимальні

робочі параметри, знизити енергоспоживання та підвищити ефективність процесу вакуумного охолодження [2].

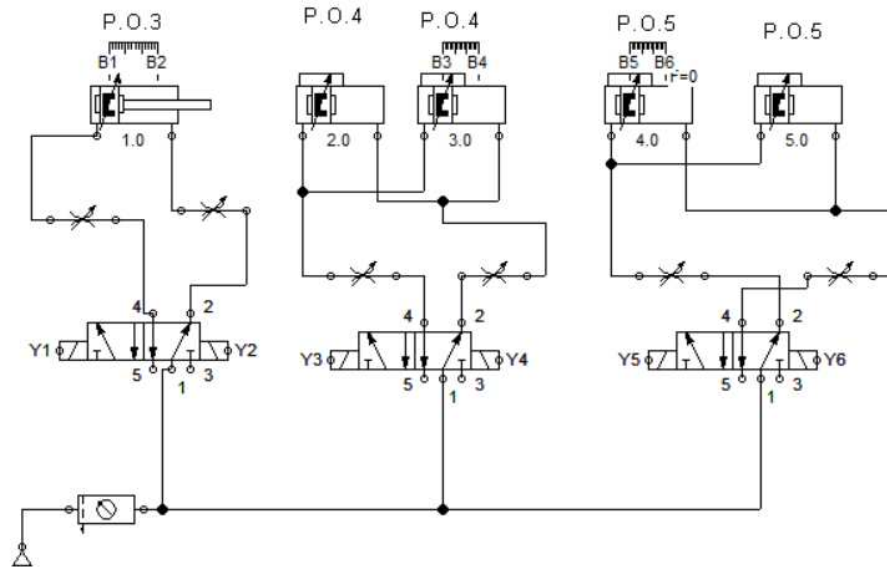


Рис. 5.2. Принципова пневматична схему підключення апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів

На рис. 5.3 зображено електричну схему керування елементами пневматичної схеми.

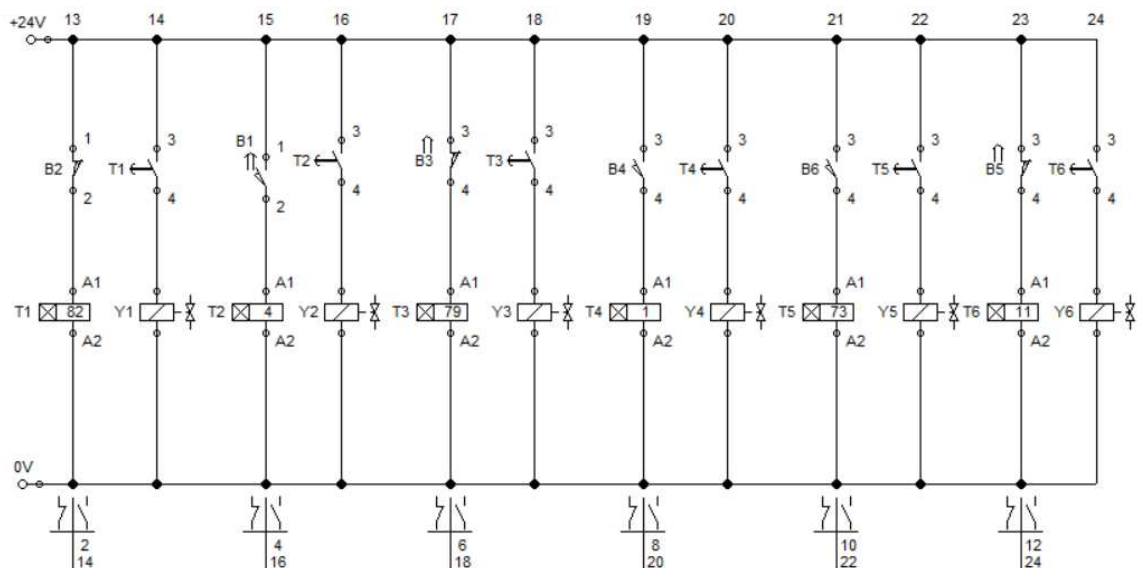


Рис. 5.3. Електрична схема керування елементами пневматичної схеми.

На рис 5.4 зображено циклограму роботи елементів пневмоприводів, порівнявши з представленою вище циклограмою роботи апарату (рис. 5.1) можна зробити висновок що пневматичну та електричну схеми роботи пневмоприводів апарату складено вірно [2].



Рис. 5.4 Циклограма роботи елементів пневмоприводів.

Розроблена пневмо та електросхема забезпечать узгоджену роботу пневмоприводів (Р.О.) апарату, забезпечуючи узгоджену роботу елементів пневмосистеми та безперервне повторення циклів в автоматичному режимі.

5.4 Будова та принцип роботи апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на прикладі батону в умовах потокового виробництва

Охолодження готових хлібобулочних виробів є найтривалішим етапом у хлібопекарській галузі, тому він привертає найбільшу увагу в процесі виробництва [20].

Впровадження вакуумного охолодження в умовах потокового виробництва дає змогу:

- Скоротити необхідні виробничі площі;
- Скоротити загальний час виробництва хлібобулочних виробів;
- Оптимізувати машино-апаратурну схему;
- Знизити потребу в ручній праці.

За рахунок вище перелічених переваг зменшується кількість необхідних операцій, інтенсифікується процес охолодження та зменшуються витрати на виготовлення одиниці продукту як наслідок зменшується собівартість продукції.

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва (рис. 5.5) впроваджений в потокову лінію з тунельною піччю площею поду 25 м² для виробництва батонів масою 0,5 кг працює таким чином: щойно випечений батон з поду печі переміщується на гірку з направляючими та крокоміром, після чого потрапляє на накопичувальний конвеєр. Коли накопичується 4 батони (1 порція), вони за допомогою захватного механізму переміщуються на

столик для вакуумного охолодження. Порція батонів накривається вакуумною камерою і охолоджується. Після цього, завдяки завантаженню нової порції на вакуумний столик, охолоджені батони зіштовхуються на розвантажувальні конвеєри, які транспортують їх на наступні операції – нарізання та пакування.

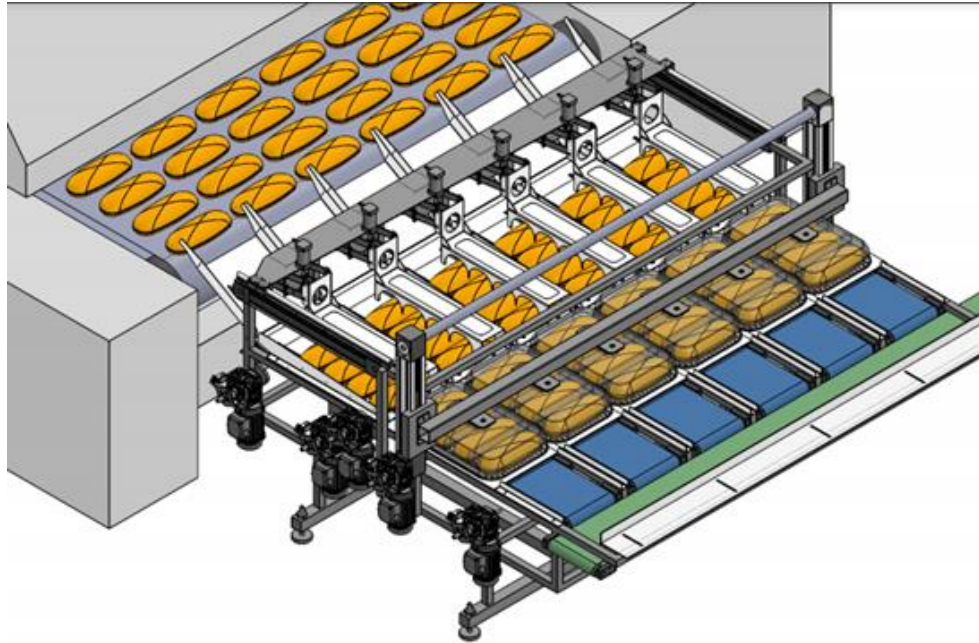


Рис. 5.5. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва є модульною конструкцією, кількість модулів конструкції залежить від кількості рядів виробів на поду печі, у нашому випадку кількість рядів виробів дорівнює 6.

Більш детально розглянемо будову та принцип роботи модуля апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів у потоковому виробництві батону масою 0,5 кг (рис. 5.6).

Щойно випечений батон потрапляє на гірку з направляючими 2, де він фіксується крокоміром 3. Далі хліб переміщується на накопичувальний конвеєр з крокоміром 4. Коли накопичується необхідна кількість батонів (4 штуки), пневмоциліндри 9 та 10 активують завантажувальний механізм 5, що переміщає батони на столик для вакуумування з направляючими 6.

Після цього, за допомогою пневмоциліндрів 11, опускається вакуумна камера 7, і відкривається клапан для підведення вакууму. Процес вакуумного охолодження триває 66 секунд. Після завершення охолодження, завдяки завантаженню нової порції батонів, охолоджені вироби зіштовхуються на розвантажувальні конвеєри 8, які транспортують їх на наступні етапи обробки. Водночас на столик для вакуумування 6 потрапляє нова порція гарячих батонів, і процес повторюється.

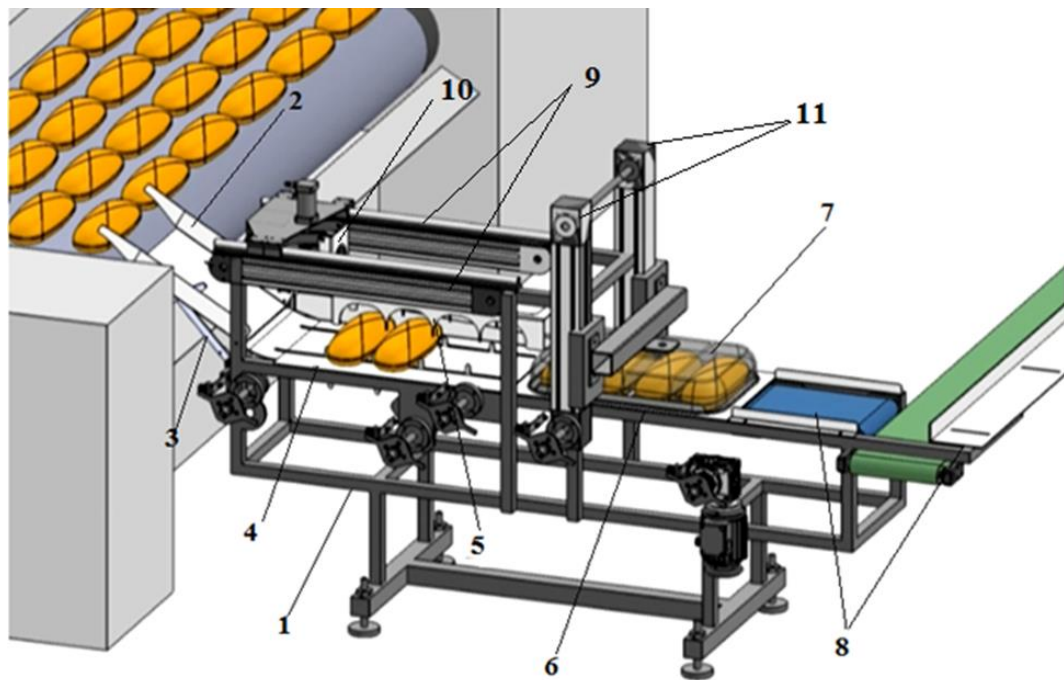


Рис. 5.6. Модуль апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва:

**1 – рама; 2 – гірка з направляючими; 3 – крокомір;
4 – накопичувальний конвеєр з крокоміром; 5 – завантажувальний механізм; 6 – столик для вакуумування з направляючими; 7 – вакуумна камера; 8 – розвантажувальні конвеєри. 9, 10 – пневмоциліндри завантажуючого механізму; 11 – пневмоциліндри для опускання та підняття вакуумної камери**

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва для батонів масою 0,5 кг дозволяє знизити час охолодження до 66 секунд і безпосередньо направити готові вироби на нарізання та пакування. Цей

розроблений апарат зменшує потребу в ручній праці та пришвидшує процес охолодження.

Основною перевагою апарату є те, що він забезпечує безперервне охолодження батонів, що дозволяє підтримувати потоковий режим виробництва, тим самим підвищуючи ефективність виробничого процесу.

5.5 Висновки до розділу

Узагальнено результати розробки обладнання для вакуумного охолодження хліба й удосконалення процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва. Проведені дослідження дозволили сформулювати практичні рекомендації щодо вибору оптимальних режимних параметрів, створити циклограму функціонування обладнання, розробити схему пневматичної системи з електронним керуванням, а також запропонувати конструкцію апарата, адаптовану до умов автоматизованої виробничої лінії. Основні результати наведено нижче:

1. Розроблені рекомендації щодо режимних параметрів процесу вакуумного охолодження:

- На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено оптимальні параметри для вакуумного охолодження батона масою 0,5 кг від початкової температури 100 °C до кінцевої 30 °C.
- Оптимальний температурний режим досягається за рахунок контрольованого відведення тепла через випаровування вологи.
- Рекомендовано контролювати швидкість зниження тиску у вакуумній камері, щоб уникнути пошкодження структури батона.
- Оптимальний час охолодження становить 66 секунд, а втрата маси батона не повинна перевищувати 5-6%.

2. Розроблено циклограму роботи обладнання:

- Циклограма забезпечує злагодженість технологічного процесу та оптимізує взаємодію між компонентами системи.
- Описано послідовність дій та тривалість операцій для кожного робочого органу апарату.

- Візуалізовано часові параметри роботи кожного елементу апарату на прикладі батона в умовах потокового виробництва.

3. Створено схему роботи пневмоприводів з електронним керуванням:

- В апараті використовуються пневмоприводи для забезпечення автоматизованої роботи.
- Розроблено пневматичну схему підключення елементів та електричну схему керування.
- Представлено циклограму роботи елементів пневмоприводів, що підтверджує правильність розроблених схем.

4. Розроблено апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів:

- Описано будову та принцип роботи апарату для вакуумного охолодження в умовах потокового виробництва.
- Апарат інтегровано в потокову лінію, що дозволяє зменшити час виробництва, скоротити виробничі площі та зменшити кількість ручної праці.
- Апарат забезпечує безперервне охолодження батонів, підвищуючи ефективність виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методологічний підхід до проектування обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва на прикладі батона.

2. Проведено аналітичний огляд способів та обладнання для охолодження готових хлібобулочних виробів в умовах сучасного хлібопекарського підприємства.

3. Встановлено вплив процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів на фізико-механічні показники готової продукції, зокрема вплив на цілісність, кінцеву вологість, термін зберігання, а також вплив на органолептичні показники такі як запах, смак, колір, хрусткість скоринки.

4. Розроблено методики та лабораторні установки для визначення впливу вакуумного охолодження на фізико-механічні показники виробу, зокрема вакуумну експериментальну установку, установку для визначення газової проникності скоринки та м'якушки, розроблено методику визначення структурно-механічних властивостей м'якушки.

5. В результаті проведених досліджень на вакуумній експериментальній установці встановлено режимні параметри при яких не відбувається руйнування батона, максимальна швидкість зниження тиску не перевищує 4,5 кПа/с, а час вакуумного охолодження складає 120 с.

6. В результаті проведених досліджень з метою інтенсифікації режимних параметрів процесу вакуумного охолодження встановлено, що м'якушка батона має значно вищу газову проникність порівняно із скоринкою. Газова проникність верхньої скоринки є нерівномірною: середня частина скоринки має меншу газову проникність ($G_{\text{ск.н}} = 0,32 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), ніж газова проникність бокової частини верхньої скоринки батону ($G_{\text{ск.н}} = 0,37 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), виявлено кореляцію між кольором скоринки та її газовою проникністю – чим темніша скоринка, тим меншу газову проникність вона має. Газова проникність нижньої скоринки є рівномірною по всій площині ($G_{\text{ск.н}} = 0,42 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$). Крім того в рамках досліджень структурно-механічних властивостей м'якушки батона встановлено, що вони залежать від температури (чим вища температура – тим нижча границя міцності), і змінюються за

лінійною залежністю яку можна виразити рівнянням: $\sigma = -30 \cdot t + 4500$; де: t - температура виробу ($^{\circ}\text{C}$), а σ - границя міцності м'якушки батону в (Па).

7. З метою інтенсифікації режимних параметрів, на основі проведених досліджень була розроблена математична модель процесу вакуумного охолодження в вакуумній камері апарату для вакуумного охолодження, яка враховує вплив процесу на фізико-механічні показники хлібобулочних виробів, що дає змогу розраховувати режимні параметри процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів.

8. Розраховано режимні параметри зміни тиску в часі, за яких не відбувається руйнування батона, а час охолодження становить 66 с.

9. Розроблено конструкцію апарату для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва, обґрунтовано вибір матеріалів, технологічних параметрів та сформовано рекомендації щодо режимних параметрів процесу вакуумного охолодження який відбуваються в середині вакуумної камери апарату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костик С. І., Асафтей О. А. Розрахунок і конструювання типового устаткування. Тонкостінні посудини та апарати [Електронний ресурс] : метод. вказівки до самот. роботи студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» спец. 7(8).05050314 «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2016. – 28 с.
2. Кривопляс-Володіна Л. О., Якимчук М. В., Семенов Д. О. Пневматика та пневмоприводи [Електронний ресурс] : лаб. практикум для студентів напр. 6.050502 «Інженерна механіка», 6.050503 «Машинобудування» / НУХТ. – Київ, 2015. – 47 с.
3. Попов С. В., Бучинський М. Я., Гнітько С. М., Чернявський А. М. Теорія механізмів технологічних машин : підручник. – Харків : НТМТ, 2019. – 268 с. – ISBN 978-617-578-309-2.
4. Ajani C.K., Zhu Z., Sun D.W. In situ investigation of cellular water transport and morphological changes during vacuum cooling of steamed breads // Food Chemistry. – 2022. – Vol. 381. – Article 132211. – ISSN 0308-8146. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132211>.
5. Ajani C.K., Zhu Z., Sun D.W. Shrinkage during vacuum cooling of porous foods: Conjugate mechanistic modelling and experimental validation // Journal of Food Engineering. – 2023. – Vol. 337. – Article 111220. – ISSN 0260-8774. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111220>
6. Alibas I., Koksall N. Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (Brassica oleracea L. var. botrytis cv. Freemont): Part I. Determination of precooling parameters // Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 34, № 4. – P. 730–737. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6456>.
7. Alibas I., Koksall N. Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (Brassica oleracea L. var. botrytis cv. Freemont): Part II. Determination of quality parameters during storage // Food Science and Technology (Campinas). – 2015. – Vol. 35, № 1. – P. 45–50. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6457>.

8. Ananingsih V.K., Sim E.Y., Chen X.D., Zhou W. Heat transfer during steaming of bread // *International Journal of Food Engineering*. – 2014. – Vol. 40, № 4. – P. 613–623. – DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2013-0023>.
9. Ansari F.A. Finite difference solution of heat and mass transfer problems related to precooling of food // *Energy Conversion and Management*. – 1999. – Vol. 40, № 8. – P. 795–802. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00147-2).
10. Arashisar Ş., Hisar O., Kaya M., Yanik T. Effects of modified atmosphere and vacuum packaging on microbiological and chemical properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets // *International Journal of Food Microbiology*. – 2004. – Vol. 97, № 2. – P. 209–214. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.05.024>.
11. Asselman A., Van Straten G., Boom R. M., Esveld D. C., Van Boxtel A. J. B. Quality prediction of bakery products in the initial phase of process design // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2007. – Vol. 8, No. 2. – P. 285–298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.01.006>.
12. Augusto C. M., Ribeiro J. B., Gaspar A. R., Ferreira V. R., Costa J. J. A mathematical model describing the two stages of low-pressure-vaporization of free water // *Journal of Food Engineering*. – 2012. – Vol. 112, No. 4. – P. 274–281. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.04.013>.
13. Babin P., Valle G. D., Dendievel R., Lassoued N., Salvo L. Mechanical properties of bread crumbs from tomography-based Finite Element simulations // *Journal of Materials Science*. – 2005. – Vol. 40. – P. 5867–5873. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5021-x>.
14. Bahroni S. A., Monteau J. Y., Rezzoug S. A., Loisel C., Macce-Rezzoug Z. Physics-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming processes of starchy material // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2014. – Vol. 85. – P. 216–226. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.09.005>.
15. Bellara S. R., McFarlane C. M., Thomas C. R., Fryer P. J. The growth of *Escherichia coli* in a food simulant during conduction cooling: combining engineering and

- microbiological modeling // *Chemical Engineering Science*. – 2000. – Vol. 55, No. 24. – P. 6085–6095. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00178-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00178-0).
16. Besbes E., Jury V., Monteau J. Y., Le Bail A. Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography // *Journal of Food Engineering*. – 2013. – Vol. 115, No. 3. – P. 415–423. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.005>.
17. Besbes E., Jury V., Monteau J. Y., Le Bail A. Water vapor transport properties during staling of bread crumb and crust as affected by heating rate // *Food Research International*. – 2013. – Vol. 50, No. 1. – P. 10–19. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.041>.
18. Bosmans G. M., Lagrain B., Fierens E., Delcour J. A. The impact of baking time and bread storage temperature on bread crumb properties // *Food Chemistry*. – 2013. – Vol. 141, No. 4. – P. 3301–3308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.031>.
19. Bredariol P., Spatti M., Vanin F. M. Different baking conditions may produce breads with similar physical qualities but unique starch gelatinization behavior // *LWT – Food Science and Technology*. – 2019. – Vol. 111. – P. 737–743. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.094>.
20. Brosnan T., Sun D. W. Influence of modulated vacuum cooling on the cooling rate, mass loss and vase life of cut lily flowers // *Biosystems Engineering*. – 2003. – Vol. 86, No. 1. – P. 45–49. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00101-6).
21. Burfoot D., Hayden R., Badran R. Simulation of a pressure cook/water and vacuum cooled processing system // *Process Engineering in the Food Industry: Developments and Opportunities* / eds. R. W. Field, J. A. Howell. – 1989.
22. Cai B., Tuo X., Song Z., Zheng Y., Gu H., Wang H. Modeling of spray flash evaporation based on droplet analysis // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 130. – P. 1044–1051. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.083>.
23. Cauvain S. P. (Ed.). *Breadmaking: Improving Quality*. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – 496 p.
24. Chainer L., Chrusciel L., Delisee C., et al. Permeability and expanded structure of baked products crumbs // *Food Biophysics*. – 2008. – Vol. 3. – P. 344–351. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-008-9073-8>.

25. Chen Q. K. J. M., Li Y., Chua K. J. Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 130. – P. 598–610. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018>.
26. Cheng H. P., Hsuen C. F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage // *Journal of Food Engineering*. – 2007. – Vol. 79, No. 1. – P. 37–46. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.027>.
27. Cheng H. P., Lin C. T. The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process // *Journal of Food Engineering*. – 2007. – Vol. 78, No. 2. – P. 569–576. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.025>.
28. Cheng Q., Sun D. W. Feasibility assessment of vacuum cooling of cooked pork ham with water compared to that without water and with air blast cooling // *International Journal of Food Science and Technology*. – 2006. – Vol. 41, No. 8. – P. 938–945. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01148.x>.
29. Cheng Q., Sun D. W. Effects of combined water cooking–vacuum cooling with water on processing time, mass loss and quality of large pork ham // *Journal of Food Process Engineering*. – 2007. – Vol. 30, No. 1. – P. 51–73. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00089.x>.
30. Cheng W. L., Chen H., Hu L., Zhang W. W. Effect of droplet flash evaporation on vacuum flash evaporation cooling: Modeling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 84. – P. 149–157. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.078>.
31. Cheng W. L., Peng Y. H., Chen H., Hu L., Hu H. P. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of vacuum spray flash evaporation cooling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 102. – P. 233–240. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.140>.
32. Cheng W. L., Zhang W. W., Chen H., Hu L. Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 55. – P. 614–628. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.014>.
33. Chhanwai N., Tank A., Raghavarao K. S. M. S., Anandhamakrishnan C. Computational fluid dynamics (CFD) modeling for bread baking process—a review // *Food*

- and Bioprocess Technology*. – 2012. – Vol. 5. – P. 1157–1172. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0804-y>.
34. Chuntranuluk S., Wells C. M., Cleland A. C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant—Part 1. Method development // *Journal of Food Engineering*. – 1998. – Vol. 37, No. 2. – P. 111–125. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00087-9).
35. Chuntranuluk S., Wells C. M., Cleland A. C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant—Part 2. Experimental testing // *Journal of Food Engineering*. – 1998. – Vol. 37, No. 2. – P. 127–141. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00088-0).
36. Chuntranuluk S., Wells C. M., Cleland A. C. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant—Part 3. Applications // *Journal of Food Engineering*. – 1998. – Vol. 37, No. 2. – P. 143–157. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00089-2).
37. Davidou S., Le Meste M., Debever E., Bekaert D. J. F. H. A contribution to the study of staling of white bread: effect of water and hydrocolloid // *Food Hydrocolloids*. – 1996. – Vol. 10, No. 4. – P. 375–383. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(96\)80016-6](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(96)80016-6).
38. De Elvira C., Sanz P. D., Carrasco J. A. Characterising the detachment of thermal and geometric centres in a parallelepipedic frozen food subjected to a fluctuation in storage temperature // *Journal of Food Engineering*. – 1996. – Vol. 29, No. 3–4. – P. 257–268. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(96\)00001-5](https://doi.org/10.1016/0260-8774(96)00001-5).
39. Demarchi S. M., Irigoyen R. M. T., Giner S. A. Vacuum drying of rosehip leathers: Modeling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention // *Journal of Food Engineering*. – 2018. – Vol. 233. – P. 9–16. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.027>.
40. Desmond E. M., Kenny T. A., Ward P., Sun D. W. Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints // *Meat Science*. – 2000. – Vol. 56, No. 3. – P. 27–32. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00052-8).

41. Dijksterhuis G., Luyten H., de Wijk R., Mojet J. A new sensory vocabulary for crisp and crunchy dry model foods // *Food Quality and Preference*. – 2007. – Vol. 18, No. 1. – P. 37–50. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.07.012>.
42. Dostal M., Petera K. Vacuum cooling of liquids: mathematical model // *Journal of Food Engineering*. – 2004. – Vol. 61, No. 4. – P. 533–539. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00223-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00223-1).
43. Drummond L., Sun D. W. Temperature evolution and mass losses during immersion vacuum cooling of cooked beef joints – A finite difference model // *Meat Science*. – 2008. – Vol. 80, No. 3. – P. 885–891. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.04.012>.
44. Drummond L., Sun D. W. Evaluation of the immersion vacuum cooling of cooked beef joints – Mathematical simulation of variations in beef size and porosity and pressure reduction rates // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2012. – Vol. 16. – P. 205–210. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.06.001>.
45. Drummond L., Sun D. W., Vila C. T., Scannell A. G. Application of immersion vacuum cooling to water-cooked beef joints – Quality and safety assessment // *LWT – Food Science and Technology*. – 2009. – Vol. 42, No. 1. – P. 332–337. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.03.003>.
46. Erdogdu F., Balaban M. O., Chau K. V. Modeling of heat conduction in elliptical cross section: I. Development and testing of the model // *Journal of Food Engineering*. – 1998. – Vol. 38, No. 2. – P. 223–239. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00100-9).
47. Everington D. W. Vacuum technology for food processing // *Food Technology International Europe*. – 1993. – P. 71–74.
48. Falcone P. M., Baiano A., Zanini F., Mancini L., Tromba G., Dreossi D., Del Nobile M. A. Three-dimensional quantitative analysis of bread crumb by X-ray microtomography // *Journal of Food Science*. – 2005. – Vol. 70, No. 4. – P. E265–E272. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07182.x>.
49. Feng C. H., Li C. Immersion vacuum cooling as a novel technique for chilling meat products: Research advances and current state-of-the-art // *Comprehensive Reviews in Food*

Science and Food Safety. – 2015. – Vol. 14, No. 6. – P. 785–795. – DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12157>.

50. Feng C. H., Sun D. W. Optimisation of immersion vacuum cooling operation and quality of Irish cooked sausage by using response surface methodology // *International Journal of Food Science and Technology*. – 2014. – Vol. 49, No. 8. – P. 1850–1858. – DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12494>.

51. Feng C. H., Drummond L., Zhang Z. H., Sun D. W. Effects of processing parameters on immersion vacuum cooling time and physico-chemical properties of pork hams // *Meat Science*. – 2013. – Vol. 95, No. 2. – P. 425–432. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.057>.

52. Feng C., Drummond L., Zhang Z., Sun D. W., Wang Q. Vacuum cooling of meat products: current state-of-the-art research advances // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2012. – Vol. 52, No. 11. – P. 1024–1038. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.594186>.

53. Flourey J., Carson J., Pham Q. T. Modelling thermal conductivity in heterogeneous media with the finite element method // *Food and Bioprocess Technology*. – 2008. – Vol. 1. – P. 161–170. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0001-6>.

54. Gao J., Wang Y., Dong Z., Zhou W. Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: A review // *International Journal of Food Science and Technology*. – 2018. – Vol. 53, No. 4. – P. 858–872. – DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.

55. Gowda B. S., Narasimhan G. S. V. L., Murthy M. K. Forced-air precooling of spherical foods in bulk: a parametric study // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 1997. – Vol. 18, No. 6. – P. 613–624. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)00028-3).

56. Grenier A., Monteau J.-Y., Le Bail A., Hayert M. Effect of external conditions on the rate of post-baking chilling of bread // *Journal of Food Engineering*. – 2002. – Vol. 55. – P. 19–24. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00224-2).

57. Guessasma S., Nouri H. Compression behaviour of bread crumb up to densification investigated using X-ray tomography and finite element computation // *Food Research*

- International*. – 2015. – Vol. 72. – P. 140–148. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.038>.
58. Guo Z. Y., Song X. Y., Song Z., Liu B. L. An improved method of immersion vacuum cooling for small cooked pork: bubbling vacuum cooling // *International Journal of Food Science and Technology*. – 2018. – Vol. 53, No. 12. – P. 2748–2753. – DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13918>.
59. He S. Y., Li Y. F. Experimental study and process parameters analysis on the vacuum cooling of iceberg lettuce // *Energy Conversion and Management*. – 2008. – Vol. 49, No. 10. – P. 2720–2726. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.04.004>.
60. He S. Y., Yu Y. Q., Zhang G. C., Yang Q. R. Effects of vacuum pre-cooling on quality of mushroom after cooling and storage // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 699. – P. 189–193. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.699.189>.
61. He Z., Qian J., Qu L., Wang Z., Yi S. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 12. – P. 1299–1303. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.017>.
62. Hibberd G. E., Parker N. S. Measurements of the compression properties of bread crumb // *Journal of Texture Studies*. – 1985. – Vol. 16, No. 1. – P. 97–110. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1985.tb00682.x>.
63. Houska M., Podlouky S., Zitny R., Gree R., Sestak J., Dostal M., Burfoot D. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids // *Journal of Food Engineering*. – 1996. – Vol. 29, No. 3–4. – P. 339–348. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(96\)00003-9](https://doi.org/10.1016/0260-8774(96)00003-9).
64. Houska M., Sun D. W., Landifeld A., Zhang Z. Experimental study of vacuum cooling of cooked beef in soup // *Journal of Food Engineering*. – 2003. – Vol. 59, No. 2–3. – P. 105–110. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00435-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00435-1).
65. Houska M., Zitny R., Sestak J., Jeschke J., Burfoot D. Vacuum cooling process modeling // *Potravinářské vědy*. – 1994. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–15.
66. Hy Z., Sun D. W. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process // *Journal of Food*

Engineering. – 2000. – Vol. 46, No. 3. – P. 189–197. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00082-0).

67. Huang Z., Kan A., Lu J., Li F., Wang T. Numerical simulation and experimental study of heat and mass transfer in cylinder-like vegetables during vacuum cooling // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2021. – Vol. 68. – Article 102607. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102607>.

68. Huber E., Soares L. P., Carcipfi B. A. M., Hense H., Laurindj J. B. Vacuum cooling of cooked mussels (*Perna perna*) // *Food Science and Technology International*. – 2006. – Vol. 12, No. 1. – P. 19–25. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1082013206062387>.

69. Jin T. X., Xu L. Development and validation of moisture movement model for vacuum cooling of cooked meat // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 75, No. 3. – P. 333–339. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.022>.

70. Jin T. X., Xu L. Numerical study on the performance of vacuum cooler and evaporation-boiling phenomena during vacuum cooling of cooked meat // *Energy Conversion and Management*. – 2006. – Vol. 47, No. 13–14. – P. 1830–1842. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.007>.

71. Jin T. X., Zhang H. C., Li G. L., Chen H. X. Theoretic analysis and experimental study on the mechanism of moisture movement during vacuum cooling of cooked meat // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. – 2008. – Vol. 24. – P. 309–312.

72. Kan A., Han H. Mathematical heat and mass transfer model and experiment of column vegetable vacuum cooling before reefer container transportation // *Journal of Shanghai Maritime University (Natural Science Edition)*. – 2010. – Vol. 31, No. 3. – P. 58–62.

73. Kinner M., Rüegg R., Weber C. A. et al. Impact of selected baking and vacuum cooling parameters on the quality of toast bread // *Journal of Food Science and Technology*. – 2021. – Vol. 58. – P. 4578–4586. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04945-x>.

74. Koribilli N., Aramudan K., Aditya Varadhan M. U. S. V. Quantifying enhancement in heat transfer due to natural convection during canned food thermal sterilization in a still retort // *Food and Bioprocess Technology*. – 2011. – Vol. 4. – P. 429–450. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0232-9>.

75. Kou X., Luo D., Zhang K., Xu W., Li X., Xu B., Liu J. Textural and staling characteristics of steamed bread prepared from soft flour added with ilin // *Food Chemistry*. – 2019. – Vol. 301. – Article 125272. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125272>.
76. LeBail A., Leray G., Perronnet A., Rolens G. Impact of the chilling conditions on the kinetics of staling of bread // *Journal of Cereal Science*. – 2011. – Vol. 54, No. 1. – P. 13–19. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.10.007>.
77. LeBail A., Boillereaux L., Davanel A., Hayert M., Lucas T., Monteau J. Y. Phase transition in foods: Effect of pressure and methods to assess or control phase transition // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2003. – Vol. 4, No. 1. – P. 15–24. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00085-1).
78. Liu L., Bi Q. C., Wang G. X. Dynamics of evaporation and cooling of a water droplet during the early stage of depressurization // In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – 2009. – Vol. 43826. – P. 1777–1785. – DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2009-12154>.
79. McDonald K., Sun D. W. Pore size distribution and structure of a cooked beef product as affected by vacuum cooling // *Journal of Food Process Engineering*. – 2001. – Vol. 24, No. 6. – P. 381–403. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2001.tb00550.x>.
80. McDonald K., Sun D. W. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product // *Journal of Food Engineering*. – 2001. – Vol. 48, No. 3. – P. 195–202. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00158-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00158-8).
81. McDonald K., Sun D. W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review // *Journal of Food Engineering*. – 2000. – Vol. 45, No. 2. – P. 55–65. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00041-8).
82. Morgan A. I., Bromley L. A., Wilke C. R. Effect of surface tension on heat transfer in boiling // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1949. – Vol. 41, No. 12. – P. 2767–2769. – DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50480a025>.
83. Mutlu Ozturk H., Ozturk H. K., Kocar G. Comparison of vacuum cooling with conventional cooling for purslane // *International Journal of Food Engineering*. – 2011. – Vol. 7, No. 6. – Article 2442. – DOI: <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2442>.

84. Novotni D., Spoljaric I. V., Drakula S., Cukelj N., Voucko B., Scetar M., Galic K., Curic D. Influence of barley sourdough and vacuum cooling on shelf life quality of partially baked bread // *Food Technology and Biotechnology*. – 2017. – Vol. 55, No. 4. – P. 464–474. – DOI: <https://doi.org/10.17113/ftb.55.04.17.5344>.
85. Ozturk H. M., Hepbasli A. Experimental performance assessment of a vacuum cooling system through exergy analysis method // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 161. – P. 781–791. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.118>.
86. Peng Y., Cheng W. Experimental investigation on the effect of heat transfer enhancement of vacuum spray flash evaporation cooling using Al₂O₃–water nanofluid // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 142. – P. 3766–3773. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.274>.
87. Pour-Damanad A. S., Jafary A., Rafiee Sh. Kinetics of the crust thickness development of bread during baking // *Journal of Food Science and Technology*. – 2014. – Vol. 51, No. 11. – P. 3439–3445. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0872-z>.
88. Primo-Martin C., De Beukelaer H., Hamer R. J., Van Vliet T. Fracture behaviour of bread crust: Effect of bread cooling conditions // *Journal of Food Engineering*. – 2008. – Vol. 89, No. 3. – P. 285–290. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.005>.
89. Pu Y. Y., Sun D. W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution // *Biosystems Engineering*. – 2017. – Vol. 156. – P. 108–119. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006>.
90. Rodrigues L. G. G., Cavaleiro D., Schmidt F. C., Laurindo J. B. Integration of cooling and vacuum cooling of carrots in a same vessel // *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. – 2012. – Vol. 32, No. 1. – P. 187–195. – DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000028>.
91. Rodrigues L. G. G., Cavaleiro D., Schmidt F. C., Laurindo J. B. Possibilities for integrating cooking and vacuum cooling of potatoes in the same vessel // *Journal of Food Process Preservation*. – 2013. – Vol. 37, No. 5. – P. 846–854. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00719.x>.
92. Roos Y. H., Drusch S. *Phase transition in foods*. – Academic Press, 2015.

93. Salehi F., Kashaninejad M. Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying // *Information Processing in Agriculture*. – 2018. – Vol. 5, No. 4. – P. 516–523. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006>.
94. Sandoval Torres S., Jomaa W., Puiggali J. R., Avaramidis S. Multiphysics modeling of vacuum drying of wood // *Applied Mathematical Modeling*. – 2011. – Vol. 35, No. 10. – P. 5006–5016. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.011>.
95. Saury D., Harmand S., Siroux M. Experimental study of flash evaporation of a water film // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2002. – Vol. 45, No. 16. – P. 3447–3457. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00056-X).
96. Song X. Y., Liu B. L. The optimization of volumetric displacement can uniformize the temperature distribution of heated ham during a vacuum cooling process // *Food Science and Technology Research*. – 2014. – Vol. 20, No. 1. – P. 43–49. – DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.20.43>.
97. Song X. Y., Guo Z. Y., Liu B. L., Jaganathan G. K. Evaluation of bubbling vacuum cooling for the small-size cooked pork // *Food and Bioprocess Technology*. – 2018. – Vol. 11. – P. 845–852. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2058-9>.
98. Song X. Y., Liu B. L., Jaganathan G. K. Mathematical simulation on the surface temperature variation of fresh-cut leafy vegetable during vacuum cooling // *International Journal of Refrigeration*. – 2016. – Vol. 65. – P. 228–237. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.009>.
99. Song X. Y., Liu B. L., Jaganathan G. K. Temperature distribution pattern of Brassica chinensis during vacuum cooling // *Journal of Food Processing*. – 2016. – Article 8247085. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/8247085>.
100. Song X. Y., Liu B. L., Jaganathan G. K., Chen L. Mechanism of spillage and excessive boiling of water during vacuum cooling // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – Vol. 56. – P. 37–42. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.04.009>.
101. Sun D. W., Hu Z. CFD predicting the effects of various parameters on core temperature and weight loss profiles of cooked meat during vacuum cooling // *Computers*

and Electronics in Agriculture. – 2002. – Vol. 34, Nos. 1–3. – P. 111–127. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00182-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00182-X).

102. Sun D. W., Hu Z. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process // *International Journal of Refrigeration*. – 2003. – Vol. 26, No. 1. – P. 19–27. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00038-5).

103. Sun D. W., Wang L. Experimental investigation of performance of vacuum cooling for commercial large cooked meat joints // *Journal of Food Engineering*. – 2004. – Vol. 61, No. 4. – P. 527–532. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00220-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00220-6).

104. Sun D. W., Wang L. Development of a mathematical model for vacuum cooling of cooked meats // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 77, No. 3. – P. 379–385. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.002>.

105. Sun D. W., Zheng L. Vacuum cooling technology for the agri-food industry: Past, present and future // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 77, No. 2. – P. 203–214. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.023>.

106. Sweat V. E. *Thermal properties of foods*. – Engineering properties of foods, 1986. – P. 49.

107. Tambunan A. H., Seo Y., Sagara Y., Marishima H., Kawagoe Y. Measurement of evaporation coefficient of water during vacuum cooling of lettuce // In: *Developments in Food Engineering: Processing of the 6th International Congress on Engineering and Food*. – Springer US, 1994. – P. 328–330. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2674-2_102.

108. Tian D., Fen L., Jiangang L., Mengli K., Jingfen Y., Xingqian Y., Donghong L. Comparison of different cooling methods for extending shelf life of postharvest broccoli // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2016. – Vol. 9, No. 6. – P. 178–185. – DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2107>.

109. Turk R., Celik E. The effect of vacuum precooling on the half cooling period and quality characteristic of Iceberg lettuce // *Physiological Basis of Postharvest Technologies*. – 1992. – Vol. 343. – P. 321–324. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.343.77>.

110. Ureta M. M., Diascorn Y., Cambert M., Flick D., Salvadori V. O., Lucas T. Water transport during bread baking: Impact of the baking temperature and the baking time // *Food*

Science and Technology International. – 2019. – Vol. 25, No. 3. – P. 187–197. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1082013218814144>.

111. Wang N., Kan A., Huang Z., Lu J. CFD simulation of heat and mass transfer through cylindrical *Zizania latifolia* during vacuum cooling // *Heat Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 56. – P. 627–637. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02736-5>.

112. Wang C., Xu R., Song Y., Jiang P. Study on water droplet flash evaporation in vacuum spray cooling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 112. – P. 279–288. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.111>.

113. Wang L. J., Sun D. W. Numerical analysis of the three-dimensional mass and heat transfer with inner moisture evaporation in porous cooked meat joints during vacuum cooling // *Transactions of the ASAE*. – 2003. – Vol. 46, No. 1. – P. 107. – DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.12535>.

114. Wang L., Sun D. W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology // *Trends in Food Science & Technology*. – 2001. – Vol. 12, Nos. 5–6. – P. 174–184. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00077-2).

115. Wang L., Sun D. W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 1: analysis of vacuum cooling system // *International Journal of Refrigeration*. – 2002. – Vol. 25, No. 7. – P. 854–861. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00094-9).

116. Wang L., Sun D. W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure // *International Journal of Refrigeration*. – 2002. – Vol. 25, No. 7. – P. 862–871. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00095-0).

117. Wang L., Sun D. W. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry – a review // *Trends in Food Science & Technology*. – 2003. – Vol. 14, No. 10. – P. 408–423. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(03\)00151-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(03)00151-1).

118. Wang L., Sun D. W. Effect of operating conditions of a vacuum cooler on cooling performance for large cooked meat joints // *Journal of Food Engineering*. – 2004. – Vol. 61, No. 2. – P. 231–240. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00095-5).

119. Wu M. Y., Chang Y. H., Shiau S. Y., Chen C. C. Rheology of fiber-enriched steamed bread: stress relaxation and texture profile analysis // *Journal of Food and Drug Analysis*. – 2012. – Vol. 20, No. 1. – P. 18. – DOI: <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2083>.
120. Xi X., Liu H., Jia M., Xie M., Tin H. A new flash boiling model for single droplet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 107. – P. 1129–1137. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.027>.
121. Xu X., Zhang X., Liu S. Experimental study on cold storage box with nanocomposite phase change material and vacuum insulation panel // *International Journal of Energy Research*. – 2018. – Vol. 42, No. 14. – P. 4429–4438. – DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4187>.
122. Yan J., Hu Z., Wu P., Xie H., Wei H., Xu H., Gao J. Optimization of hot-plate and microwave combined vacuum freeze drying process of water-oat // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. – 2017. – Vol. 33, No. 1. – P. 262–270. – DOI: <https://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.01.036>.
123. Zhang Z., Gao J., Zhang S., Xie Y., Zhao L. Heat and mass transfer modeling of vacuum cooling for porous food material // *Bulgarian Chem Commun*. – 2015. – Vol. 47, No. 4. – P. 1089–1094.
124. Zhang Z., Zhang Y., Su T., Zhang W., Zhao L., Li X. Heat and mass transfer of vacuum cooling for porous foods-parameter sensitivity analysis // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – Vol. 2014, Article ID 613028. – P. 1–8. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/613028>.
125. Zhang Z., Sun D. W. Modelling of three-dimensional heat and mass transfer during vacuum cooling of cooked diced beefs // *III International Symposium on Application of Modelling as an Innovative Technology in the Agri-Food Chain; MODEL-IT 674*. – 2005. – P. 199–204. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.674.22>.
126. Zhang Z., Drummond L., Sun D. W. Vacuum cooling in bulk of beef pieces of different sizes and shape–Evaluation and comparison to conventional cooling methods // *Journal of Food Engineering*. – 2013. – Vol. 116, No. 2. – P. 581–587. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.036>.

127. Zhao C. J., Han J. W., Yang X. T., Qian J. P., Fan B. L. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 168. – P. 314–331. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.101>.
128. Zhang L., Sun D. W. Vacuum cooling for the food industry—a review of recent research advances // *Trends in Food Science & Technology*. – 2004. – Vol. 15, No. 12. – P. 555–568. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.09.002>.
129. Zhu Z., Geng Y., Sun D. W. Effects of operation processes and conditions on enhancing performances of vacuum cooling of foods: A review // *Trends in Food Science & Technology*. – 2019. – Vol. 85. – P. 67–77. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.011>.
130. Zhu Z., Geng Y., Sun D. W. Effects of pressure reduction modes on vacuum cooling efficiency and quality related attributes of different parts of pakchoi (*Brassica Chinensis* L.) // *Postharvest Biology and Technology*. – 2021. – Vol. 173. – Article ID 111409. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111409>.
131. Zhu Z., Li T., Sun D. W. Pressure-related cooling and freezing techniques for the food industry: fundamentals and applications // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2020. – Vol. 61, No. 17. – P. 2793–2808. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1841729>.
132. Zhu Z., Li Y., Sun D. W. Effects of initial temperatures on vacuum film cooling and vacuum spray cooling on apple juice and milk // *Journal of Food Processing and Preservation*. – 2020. – Vol. 44, No. 7. – Article ID e14500. – DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14500>.
133. Zhu Z., Li Y., Sun D. W., Wang H. W. Developments of mathematical models for simulating vacuum cooling process for food products – a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2018. – Vol. 59, No. 5. – P. 715–727. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1490696>.
134. Zhu Z., Wu X., Geng Y., Sun D. W., Chen H., Zhao Y., Pan H. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages // *LWT*. – 2018. – Vol. 94. – P. 190–197. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.002>.

ДОДАТОК 1

Таблиця 1

№ зразка	L, (м)	H, (м)	B, (м)	R (l 1,3), (м)	H, (м)	a, (м)	n, (м)	L ₀ , (м)	F ₂ , (м ²)	F _{1,3} , (м ²)	F ₂ , (м ²)	F _{1,3} , (м ²)	F _{под2} , (м ²)	F _{под1,3} , (м ²)	F _{заг} , (м ²)
1	0,285	0,082	0,164	0,067	0,015	0,015	0,944	0,151	0,032	0,028	0,002	0,006	0,020	0,014	0,103
2	0,290	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,160	0,033	0,027	0,002	0,006	0,021	0,013	0,102
3	0,290	0,079	0,158	0,064	0,015	0,015	0,945	0,162	0,033	0,026	0,002	0,006	0,021	0,013	0,100
4	0,260	0,083	0,166	0,068	0,015	0,015	0,943	0,124	0,026	0,029	0,002	0,006	0,017	0,015	0,095
5	0,275	0,075	0,150	0,060	0,015	0,015	0,948	0,155	0,029	0,023	0,002	0,006	0,019	0,011	0,090
6	0,290	0,065	0,130	0,050	0,015	0,015	0,955	0,190	0,030	0,016	0,003	0,005	0,019	0,008	0,080
7	0,285	0,070	0,140	0,055	0,015	0,015	0,951	0,175	0,030	0,019	0,003	0,005	0,019	0,009	0,086
8	0,295	0,086	0,172	0,071	0,015	0,015	0,942	0,153	0,034	0,032	0,002	0,007	0,022	0,016	0,112
9	0,295	0,070	0,140	0,055	0,015	0,015	0,951	0,185	0,032	0,019	0,003	0,005	0,020	0,009	0,089
10	0,283	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,153	0,031	0,027	0,002	0,006	0,020	0,013	0,099
11	0,283	0,078	0,156	0,063	0,015	0,015	0,946	0,157	0,031	0,025	0,002	0,006	0,020	0,012	0,097
12	0,290	0,068	0,136	0,053	0,015	0,015	0,952	0,184	0,031	0,018	0,003	0,005	0,020	0,009	0,084
13	0,230	0,090	0,180	0,075	0,015	0,015	0,940	0,080	0,019	0,035	0,001	0,007	0,012	0,018	0,092
14	0,229	0,076	0,152	0,061	0,015	0,015	0,947	0,107	0,020	0,023	0,002	0,006	0,013	0,012	0,076
15	0,268	0,071	0,142	0,056	0,015	0,015	0,950	0,156	0,027	0,020	0,002	0,005	0,017	0,010	0,082
16	0,270	0,073	0,146	0,058	0,015	0,015	0,949	0,154	0,028	0,021	0,002	0,005	0,018	0,011	0,085
17	0,300	0,070	0,140	0,055	0,015	0,015	0,951	0,190	0,033	0,019	0,003	0,005	0,021	0,009	0,090
18	0,300	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,170	0,035	0,027	0,003	0,006	0,022	0,013	0,105
19	0,295	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,165	0,034	0,027	0,002	0,006	0,021	0,013	0,104
20	0,210	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,080	0,016	0,027	0,001	0,006	0,010	0,013	0,074
21	0,260	0,080	0,160	0,065	0,015	0,015	0,945	0,130	0,027	0,027	0,002	0,006	0,017	0,013	0,091
22	0,275	0,075	0,150	0,060	0,015	0,015	0,948	0,155	0,029	0,023	0,002	0,006	0,019	0,011	0,090
23	0,320	0,050	0,100	0,035	0,015	0,015	0,974	0,250	0,027	0,008	0,004	0,003	0,018	0,004	0,064
24	0,290	0,065	0,130	0,050	0,015	0,015	0,955	0,190	0,030	0,016	0,003	0,005	0,019	0,008	0,080
25	0,300	0,065	0,130	0,050	0,015	0,015	0,955	0,200	0,031	0,016	0,003	0,005	0,020	0,008	0,083
26	0,285	0,075	0,150	0,060	0,015	0,015	0,948	0,165	0,031	0,023	0,002	0,006	0,020	0,011	0,093

Продовження таблиці 1

№ зразка	L, (м)	H, (м)	B, (м)	R (l 1,3), (м)	H, (м)	a, (м)	n, (м)	L ₀ , (м)	F ₂ , (м ²)	F _{1,3} , (м ²)	F ₂ , (м ²)	F _{1,3} , (м ²)	F _{под2} , (м ²)	F _{под1,3} , (м ²)	F _{заг} , (м ²)
27	0,295	0,070	0,140	0,055	0,015	0,015	0,951	0,185	0,032	0,019	0,003	0,005	0,020	0,009	0,089
28	0,283	0,065	0,130	0,050	0,015	0,015	0,955	0,183	0,029	0,016	0,003	0,005	0,018	0,008	0,078
29	0,295	0,075	0,150	0,060	0,015	0,015	0,948	0,175	0,033	0,023	0,003	0,006	0,021	0,011	0,096
30	0,290	0,075	0,150	0,060	0,015	0,015	0,948	0,170	0,032	0,023	0,003	0,006	0,020	0,011	0,095
Середнє значення	0,281	0,074	0,149	0,059	0,015	0,015	0,949	0,162	0,030	0,023	0,002	0,006	0,019	0,011	0,091

Таблиця 2

Час, (с)	Тиск, (кПа)	Температура кипіння води, °С	Об'єм 1 кг пари за відповідного тиску V', (м ³ /кг)	Енергія фазового переходу r, (кДж/кг)	Кількість тепла, на фазовий перехід води в пару q(τ) кДж	Випарування на волога W(τ) з одиниці маси (0,5) продукту (кг)	Об'єм пари що утворюється в результаті охолодження V (м ³)	J - потік газу через скоринку батону (м ³ /с)	Газова проникність G (м ³ /(м ² ·с)),	Товщина скоринки L (м)	Розрахунок міцності σ (Па)	Тиск в середині батона P ₂ (кПа)	Тиск у вакуум камері P ₁ (кПа)	Інтенси́вність внутрішніх стоків тепла q _v (Вт)
0	101,325	100,000	1,674	2257,2	0	0	0	0	0,32	0,005	1500	0,000	101,00	0,000
1	91,573	98,100	1,781	2262,137	5,373	0,001188	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1557	94,825	94,825	0,006
2	82,900	97,188	1,840	2264,712	2,525	0,001116	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1584,37	91,573	91,573	2,525
3	75,567	94,470	2,020	2271,779	2,446	0,00108	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1665,909	82,900	82,900	2,446
4	69,324	91,986	2,202	2278,137	2,235	0,000984	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1740,424	75,567	75,567	2,235
5	63,935	89,701	2,388	2284,177	2,056	0,000903	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1808,968	69,324	69,324	2,056
6	59,244	87,588	2,576	2289,57	1,901	0,000832	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1872,348	63,935	63,935	1,901
7	55,126	85,625	2,766	2294,574	1,767	0,000772	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1931,243	59,244	59,244	1,767
8	51,489	83,793	2,959	2299,238	1,649	0,000719	0,0020	0,0020	0,32	0,005	1986,202	55,126	55,126	1,649
9	48,264	82,077	3,154	2303,607	1,545	0,000672	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2037,688	51,489	51,489	1,545

Продовження таблиці 2

Час, (с)	Тиск, (кПа)	Температ ура кипіння вологи °С	Об'єм 1 кг пари за відпіві дного тиску V' , (м ³ /кг)	Енергія фазового переходу г, (кДж/кг)	Кількість тепла, на фазовий перехід води в пару $q(\tau)$ кДж	Випаруван а волога $W(\tau)$ з одиниці маси (0,5) продукту (кг)	Об'єм пари що утворю ється в результ аті охолод ження V (м ³)	J - потік газу через скорин ку батону (м ³ /с)	Газова проник ність G (м ³ /(м ² · с)),	Товщ ина скорин ки L (м)	Розраху нок міцності σ (Па)	Тиск в середині батона P_2 (кПа)	Тиск у вакуум камері P_1 (кПа)	Інтен сивність внутр ішніх стоків тепла q_v (Вт)
10	45,369	80,464	3,352	2307,694	1,452	0,00063	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2086,085	48,264	48,264	1,452
11	42,779	78,943	3,551	2311,542	1,369	0,000593	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2131,707	45,369	45,369	1,369
12	40,432	77,505	3,753	2315,137	1,294	0,00056	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2174,846	42,779	42,779	1,294
13	38,307	76,142	3,956	2318,544	1,226	0,00053	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2215,725	40,432	40,432	1,226
14	36,374	74,848	4,161	2321,78	1,165	0,000503	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2254,565	38,307	38,307	1,165
15	34,606	73,615	4,368	2324,823	1,109	0,000478	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2291,54	36,374	36,374	1,109
16	32,984	72,440	4,577	2327,7	1,058	0,000455	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2326,804	34,606	34,606	1,058
17	31,492	71,317	4,788	2330,508	1,011	0,000434	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2360,501	32,984	32,984	1,011
18	30,116	70,241	5,000	2333,196	0,968	0,000415	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2392,755	31,492	31,492	0,968
19	28,843	69,211	5,213	2335,773	0,928	0,000398	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2423,678	30,116	30,116	0,928
20	27,664	68,221	5,429	2338,169	0,891	0,000381	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2453,366	28,843	28,843	0,891
21	26,567	67,270	5,646	2340,525	0,856	0,000366	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2481,904	27,664	27,664	0,856
22	25,546	66,354	5,864	2342,814	0,824	0,000352	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2509,373	26,567	26,567	0,824
23	24,591	65,472	6,084	2345,02	0,794	0,000339	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2535,845	25,546	25,546	0,794
24	23,697	64,621	6,305	2347,111	0,766	0,000327	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2561,383	24,591	24,591	0,766
25	22,858	63,798	6,528	2349,104	0,740	0,000315	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2586,048	23,697	23,697	0,740
26	22,075	63,004	6,750	2351,091	0,715	0,000305	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2609,894	22,858	22,858	0,715
27	21,338	62,234	6,977	2352,938	0,692	0,000294	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2632,973	22,075	22,075	0,692
28	20,640	61,489	7,204	2354,726	0,670	0,000285	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2655,321	21,338	21,338	0,670
29	19,982	60,767	7,431	2356,482	0,650	0,000276	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2676,98	20,640	20,640	0,650
30	19,365	60,067	7,659	2358,233	0,630	0,000268	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2697,992	19,982	19,982	0,630

Продовження таблиці 2

Час, (с)	Тиск, (кПа)	Температ ура кипіння вологи °С	Об'єм 1 кг пари за відпіві дного тиску V', (м³/кг)	Енергія фазового переходу г, (кДж/кг)	Кількіст ь тепла, на фазовий перехід води в пару q(τ) кДж	Випаруван а волога W(τ) з одиниці маси (0,5) продукту (кг)	Об'єм пари що утворю ється в результ аті охолод ження V (м³)	J - потік газу через скорин ку батону (м³/с)	Газова проник ність G (м³/(м²· с)),	Товщи на скорин ки L (м)	Розраху нок міцності σ (Па)	Тиск в середи ні батона P₂ (кПа)	Тиск у вакуум камері P₁ (кПа)	Інтен сивні сть внутр ішніх стоків тепла q _v (Вт)
31	18,724	59,366	7,891	2359,872	0,631	0,000268	0,0020	0,0020	0,32	0,005	2719,023	19,365	19,365	0,631
32	18,115	58,665	8,144	2361,638	0,631	0,000267	0,0021	0,0021	0,32	0,005	2740,057	18,724	18,724	0,631
33	17,529	57,963	8,397	2363,389	0,631	0,000267	0,0022	0,0022	0,32	0,005	2761,106	18,115	18,115	0,631
34	16,958	57,261	8,663	2365,074	0,632	0,000267	0,0022	0,0022	0,32	0,005	2782,177	17,529	17,529	0,632
35	16,399	56,558	8,938	2366,76	0,632	0,000267	0,0023	0,0023	0,32	0,005	2803,254	16,958	16,958	0,632
36	15,857	55,855	9,222	2368,447	0,633	0,000267	0,0024	0,0024	0,32	0,005	2824,341	16,399	16,399	0,633
37	15,332	55,152	9,517	2370,136	0,633	0,000267	0,0025	0,0025	0,32	0,005	2845,446	15,857	15,857	0,633
38	14,819	54,448	9,826	2371,825	0,634	0,000267	0,0025	0,0025	0,32	0,005	2866,564	15,332	15,332	0,634
39	14,320	53,744	10,143	2373,541	0,634	0,000267	0,0026	0,0026	0,32	0,005	2887,689	14,819	14,819	0,634
40	13,839	53,039	10,472	2375,303	0,634	0,000267	0,0027	0,0027	0,32	0,005	2908,83	14,320	14,320	0,634
41	13,369	52,334	10,818	2376,999	0,635	0,000267	0,0028	0,0028	0,32	0,005	2929,993	13,839	13,839	0,635
42	12,911	51,628	11,175	2378,693	0,635	0,000267	0,0029	0,0029	0,32	0,005	2951,16	13,369	13,369	0,635
43	12,470	50,922	11,544	2380,379	0,635	0,000267	0,0030	0,0030	0,32	0,005	2972,339	12,911	12,911	0,635
44	12,040	50,215	11,930	2382,005	0,636	0,000267	0,0031	0,0031	0,32	0,005	2993,538	12,470	12,470	0,636
45	11,621	49,509	12,332	2383,729	0,636	0,000267	0,0032	0,0032	0,32	0,005	3014,744	12,040	12,040	0,636
46	11,215	48,801	12,747	2385,477	0,636	0,000267	0,0033	0,0033	0,32	0,005	3035,961	11,621	11,621	0,636
47	10,823	48,093	13,179	2387,176	0,637	0,000267	0,0034	0,0034	0,32	0,005	3057,195	11,215	11,215	0,637
48	10,442	47,385	13,631	2388,876	0,638	0,000267	0,0035	0,0035	0,32	0,005	3078,447	10,823	10,823	0,638
49	10,069	46,677	14,099	2390,576	0,638	0,000267	0,0036	0,0036	0,32	0,005	3099,704	10,442	10,442	0,638
50	9,711	45,968	14,582	2392,275	0,638	0,000267	0,0038	0,0038	0,32	0,005	3120,975	10,069	10,069	0,638
51	9,364	45,258	15,093	2393,907	0,639	0,000267	0,0039	0,0039	0,32	0,005	3142,27	9,711	9,711	0,639

Продовження таблиці 2

Час, (с)	Тиск, (кПа)	Температура кипіння вологи °С	Об'єм 1 кг пари за відпіві дного тиску V' , (м ³ /кг)	Енергія фазового переходу r , (кДж/кг)	Кількіс ть тепла, на фазовий перехід води в пару $q(\tau)$ кДж	Випаруван а волога $W(\tau)$ з одиниці маси (0,5) продукту (кг)	Об'єм пари що утворю ється в результ аті охолод ження V (м ³)	J - потік газу через скорин ку батону (м ³ /с)	Газова проник ність G (м ³ /(м ² · с)),	Товщи на скорин ки L (м)	Розраху нок міцності σ (Па)	Тиск в середині батона P_2 (кПа)	Тиск у вакуум камері P_1 (кПа)	Інтен сивні сть внутр ішніх стоків тепла q_v (Вт)
52	9,025	44,548	15,622	2395,586	0,639	0,000267	0,0040	0,0040	0,32	0,005	3163,57	9,364	9,364	0,639
53	8,686	43,837	15,622	2395,586	0,639	0,000267	0,0042	0,0042	0,32	0,005	3184,879	9,025	9,025	0,639
54	8,370	43,102	16,761	2399,145	0,662	0,000276	0,0043	0,0043	0,32	0,005	3206,939	8,686	8,686	0,662
55	8,063	42,391	17,362	2400,863	0,640	0,000267	0,0045	0,0045	0,32	0,005	3228,284	8,370	8,370	0,640
56	7,764	41,679	17,983	2402,571	0,641	0,000267	0,0046	0,0046	0,32	0,005	3249,635	8,063	8,063	0,641
57	7,477	39,967	18,626	2404,277	0,641	0,000267	0,0048	0,0048	0,32	0,005	3271,001	7,764	7,764	0,641
58	7,198	38,540	19,306	2405,917	0,642	0,000267	0,0050	0,0050	0,32	0,005	3292,391	7,477	7,477	0,642
59	6,927	37,827	20,012	2407,603	0,642	0,000267	0,0052	0,0052	0,32	0,005	3313,786	7,198	7,198	0,642
60	6,665	36,113	20,743	2409,315	0,642	0,000267	0,0053	0,0053	0,32	0,005	3335,19	6,927	6,927	0,642
61	6,413	35,398	21,508	2411,029	0,643	0,000267	0,0055	0,0055	0,32	0,005	3356,614	6,665	6,665	0,643
62	6,168	34,683	22,312	2412,744	0,643	0,000267	0,0057	0,0057	0,32	0,005	3378,055	6,413	6,413	0,643
63	5,930	33,968	23,145	2414,46	0,643	0,000267	0,0059	0,0059	0,32	0,005	3399,501	6,168	6,168	0,643
64	5,702	32,252	24,009	2416,174	0,644	0,000267	0,0062	0,0062	0,32	0,005	3420,962	5,930	5,930	0,644
65	5,481	31,535	24,924	2417,821	0,645	0,000267	0,0064	0,0064	0,32	0,005	3442,448	5,702	5,702	0,645
66	5,266	30,215	25,876	2419,515	0,645	0,000267	0,0066	0,0066	0,32	0,005	3463,938	5,481	5,481	0,645

ДОДАТОК 2



Затверджено:

Директор Хорьков О.О.

Акт впровадження науково-дослідної роботи на підприємстві ТОВ «КИЇВСЬКИЙ ПЕКАРНИЙ ДІМ»

ТОВ «КИЇВСЬКИЙ ПЕКАРНИЙ ДІМ» протягом тривалого часу випікав батон вищого гатунку масою 0,5 кг за стандартною рецептурою та технологією виробництва на печах тунельного типу.

Виробництво батона відбувається на потоковій лінії, де всі операції технологічного процесу - від подачі сировини на замішування тіста до випікання батона - є механізовані і автоматизовані. На стадії фінішних операцій відповідно до сучасних вимог реалізації продукту передбачено нарізання і пакування готових виробів, для забезпечення якості і мікробіологічної чистоти, під час зберігання і реалізації продукту. Але нарізання і пакування можливе при температурі батону не вище 30 °С.

Стадія охолодження є тривалою і відбувається протягом декількох годин, в приміщеннях виробничого цеху на вагонетках із застосуванням ручної праці. Наразі не існує технічних рішень і обладнання для охолодження в умовах поточних комплексно механізованих і автоматизованих ліній, тому тема науково-дослідної роботи є актуальною і своєчасною.

Автором і виконавцем науково-дослідної роботи Козаком О.С., по дослідженнях вакуумного охолодження і розробленню обладнання для вакуумного охолодження батона проводилась з 2019 р. і до тепер, на підприємстві ТОВ «КИЇВСЬКИЙ ПЕКАРНИЙ ДІМ» з використанням лабораторної і виробничої бази підприємства, на умовах договору співпраці і взаємодопомоги. Для обговорення результатів досліджень залучались працівники інженерно технічного персоналу.

Результати проведеної науково дослідної роботи включають:

- Експериментально досліджено та визначено оптимальний режим вакуумного охолодження батона з урахуванням його реологічних властивостей і газопроникності скоринки. Це дозволило забезпечити збереження якості виробу та уникнути його деформації або руйнування після вакуумного охолодження.

- Розроблено конструкцію апарата для охолодження батона в потоці на основі оригінальних інженерних рішень, конструктивних розрахунків і математичного моделювання процесу вакуумного охолодження.

Основні елементи конструкції апарата, у межах наявних фінансових і технічних можливостей, були випробувані на експериментальних установках і стендах із проведенням аналізу якості отриманої продукції.

Впровадження запропонованого способу охолодження сприятиме підвищенню ефективності виробничих процесів, скороченню часу охолодження продукції, покращенню її якості, а також зменшенню енергоспоживання, що є важливим для оптимізації витрат та підвищення конкурентоспроможності підприємств хлібопекарської галузі.

Результати роботи Козака О.С. обговорені на технічній нараді підприємства за участю провідних працівників. Проведена робота має беззаперечне значення для вдосконалення роботи підприємств хлібопекарської промисловості не лише України, результати мають бути поширені на весь асортимент хлібобулочних виробів.

Головний Інженер



Микола ЛЯШКО

Професор кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв



Володимир ТЕЛИЧКУН

Аспірант кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв



Олександр КОЗАК

ДОДАТОК 3



УКРАЇНА (19) UA (11) 156000 (13) U
(51) МПК (2024.01)
A21D 15/02 (2006.01)
A21D 17/00

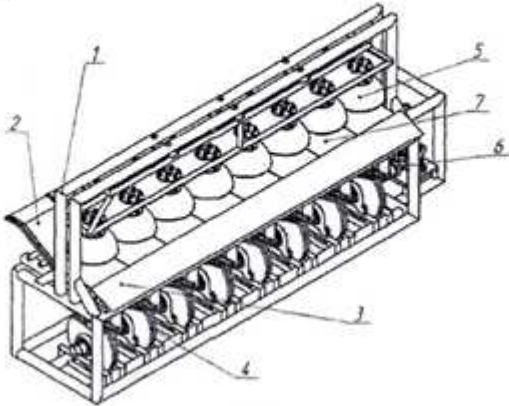
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 05202	(72) Винахідник(и): Десик Микола Григорович (UA), Теличкун Володимир Іванович (UA), Теличкун Юлія Станіславівна (UA), Козак Олександр Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 02.11.2023	(73) Володівець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 25.04.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 24.04.2024, Бюл.№ 17	

(54) АПАРАТ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ТА КОНДИТЕРСЬКИХ БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ З РУХОМИМ СТОЛИКОМ

(57) Реферат:
Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з рухомих столиком містить вакуумну камеру, систему створення вакууму, яка з'єднана з вакуумною камерою для вилучення пари та повітря і створення в ній необхідного вакууму. Використовуються вакуумні камери роз'ємного типу, які складаються з нерухомої кришки та рухомого столика, а апарат додатково оснащений напрямними для завантаження та розвантаження.



Фіг. 1

UA 156000 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 156905 (13) U
(51) МПК (2024.01)
A21D 15/00
A21D 17/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

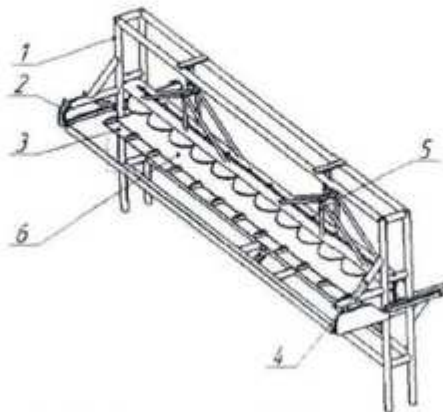
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2023 05199	(72) Винахідник(и): Десик Микола Григорович (UA), Теличкун Володимир Іванович (UA), Теличкун Юлія Станіславівна (UA), Козак Олександр Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 02.11.2023	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 22.08.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 21.08.2024, Бюл. № 34	

(54) АПАРАТ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОВУЛОЧНИХ ТА КОНДИТЕРСЬКИХ БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ З ЗАВАНТАЖУВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ

(57) Реферат:

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошняних виробів з завантажувальним пристроєм, який містить вакуумні камери, систему створення вакууму, яка з'єднана з вакуумною камерою для вилучення пари та повітря і створення в ній необхідного вакууму. Вакуумні камери використовуються роз'ємного типу, які складаються з рухомих кришок та столика, який служить також розвантажувальним механізмом, а апарат додатково оснащений завантажувальним пристроєм.



Фіг. 1

UA 156905 U