

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BREAD CRUMB FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF VACUUM COOLING PROCESS

O. Kozak, Y. Telychkun, V. Telychkun

National University of Food Technologies

Key words:

*Bakery products
Pressure vacuum cooling
Rheological properties
Operational parameters*

Article history:

Received 11.07.2024
Received in revised form
30.07.2024
Accepted 16.08.2024

Corresponding author:

O. Kozak
E-mail:
oleksandrkozak2@gmail.
com

Citation: Козак О. С., Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. (2024). Визначення реологічних характеристик м'якучки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 90—99.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-9

ABSTRACT

Cooling of bakery products is an important final and the longest stage of their production (approximately 3 hours), performed to ensure the necessary rheological characteristics required for slicing and packaging operations. After baking, hot products can deform and lose their shape, structure, and porosity due to mechanical impact. Vacuum cooling is considered the fastest and most efficient method among those used in production, but additional research is needed for its successful implementation in continuous production. This is necessary to determine the optimal parameters for each type of product to avoid deformation and damage.

We conducted a study of the rheological characteristics of baton crumb under production conditions. The baton was prepared in a tunnel-type oven BN 25 from premium wheat flour with a mass of 0.5 kg. The studies were carried out using a penetrometer AP 4/1 with a flat indenter, employing the methodology we developed.

As a result of the studies, we established that the quality of the finished and vacuum-cooled bakery products is determined by the operating parameters of the vacuum cooling process. These parameters significantly depend on the rheological properties of the bakery product crumb. The study results showed that these properties change depending on the crumb temperature: the higher the temperature of the finished bakery product, the lower the yield strength of the crumb.

The yield strength of the baton crumb changes linearly depending on the temperature. At a temperature of 100 °C, the yield strength is 1500 Pa, and at 30 °C, it is 3600 Pa. This dependence can be expressed by the equation:

$$\sigma = 30t + 4500,$$

where t — is the temperature of the baton crumb (°C); σ — is the yield strength of the baton crumb (Pa).

ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК М'ЯКУШКИ БАТОНА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

О. С. Козак, Ю. С. Теличкун, В. І. Теличкун

Національний університет харчових технологій

Охолодження хлібобулочних виробів є важливим завершальним і найдовшим етапом їх виробництва (близько 3 год), що забезпечує необхідні реологічні характеристики, які потрібні для виконання операцій нарізання і пакування. Після випікання гарячі вироби можуть деформуватися та втратити форму, структуру і пористість через механічний вплив. Вакуумне охолодження вважається найшвидшим і найефективнішим способом серед тих, що використовуються на виробництві, але для його успішного впровадження у потокове виробництво необхідно провести додаткові дослідження. Це потрібно для визначення оптимальних параметрів для кожного сорту виробу, щоб уникнути його деформації та пошкодження.

Дослідження реологічних характеристик м'якушки батона проводилось у виробничих умовах. Батон був приготований у печі тунельного типу БН 25 з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг. Дослідження проводилися за допомогою пенетрометра АП 4/1 з плоским індентором.

У результаті проведених досліджень встановлено, що якість готових і охолоджених за допомогою вакуумного способу хлібобулочних виробів визначається режимними параметрами процесу вакуумного охолодження. Ці параметри значною мірою залежать від реологічних властивостей м'якушки хлібобулочного виробу. Результати досліджень показали, що ці властивості змінюються залежно від температури м'якушки: чим вища температура готового хлібобулочного виробу, тим менші показники границі міцності м'якушки.

Значення границі міцності м'якушки батона змінюється лінійно залежно від температури. За температури 100 °С границя міцності становить 1500 Па, а 30 °С — 3600 Па. Цю залежність можна виразити рівнянням:

$$\sigma = 30t + 4500,$$

де t — температура м'якушки батона (°С); σ — границя міцності м'якушки батона (Па).

Ключові слова: хлібобулочні вироби, тиск, вакуумне охолодження, реологічні властивості, режимні параметри.

Постановка проблеми. Процес охолодження хлібобулочних виробів є завершальним етапом виробництва, який виконується з метою забезпечення таких реологічних характеристик, що дають змогу проводити операції нарізання та пакування. Необхідність охолодження викликана тим, що щойно випечені гарячі хлібобулочні вироби під впливом механічних сил можуть зазнавати деформації, втрачати форму, структуру та пористість, а також викликати появу конденсату в упаковці (Everington, 2003; Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018; Zhang та ін., 2014).

Процес вакуумного охолодження хлібобулочних виробів відбувається за рахунок відбору тепла через адіабатне кипіння води, яка знаходиться всередині гарячого хлібобулочного виробу (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Peng, Cheng, 2017; Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019).

Протягом тривалого часу дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів проводяться багатьма іноземними та вітчизняними науковцями. Однак впровадження вакуумного способу охолодження хлібобулочних виробів вимагає удосконалення як теорії (Everington, 2003; McDonald, 2001; Ajani, Zhu, & Sun, 2023), так і параметрів процесу (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Peng, & Cheng, 2017).

Наприклад, занадто інтенсивне зниження тиску у вакуумній камері викликає градієнт тиску між парою у виробі, що охолоджується, та навколишнім середовищем. Це призводить до розтріскування скоринки батона (рис. 1) та відриву м'якушки від нижньої скоринки (рис. 2) (Ajani, Zhu, & Sun, 2023; Kinner та ін., 2021).

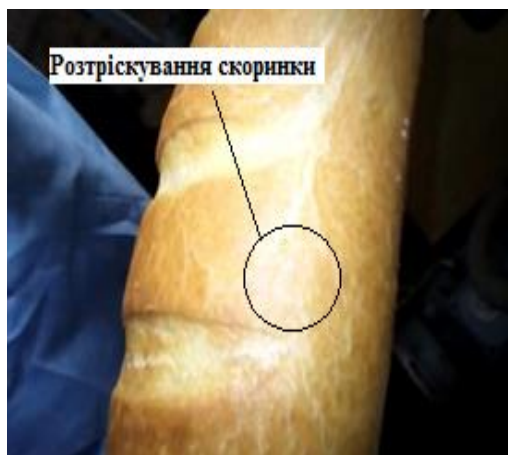


Рис. 1. Розтріскування скоринки батона в результаті занадто інтенсивного зниження тиску у вакуум-камері



Рис. 2 Руйнування подового хліба: 1 — зразок за правильно підібраним режимом вакуумного охолодження; 2, 3 — зразки за занадто інтенсивного режиму вакуумного охолодження

Під час наших досліджень режимних параметрів вакуумного охолодження батона було виявлено, що утворена під час випічки скоринка має великий опір, що

перешкоджає дифузії водяної пари з середини батона в навколишнє середовище. У такому випадку інтенсивність охолодження обмежується газопроникністю скоринки та реологічними властивостями м'якушки батона (Козак, & Теличкун, 2023).

Також на експериментальній установці був встановлений оптимальний режим охолодження батона до температури 30 °С, який представлений на графіку (рис. 3, крива 1). Криві 2 і 3 на рис. 3 відповідають зразкам 2 і 3 на рис. 2, і при таких режимах виявлено, що відбувається розрив м'якушки досліджуваного зразка, що не відповідає встановленим вимогам якості (Козак, & Теличкун, 2023).

При режимі, що представлений кривою 1 на рис. 3, час охолодження батона масою 0,5 кг складає 2 хв, а максимальна швидкість утворення розрідження не перевищує 4,5 кПа/с.

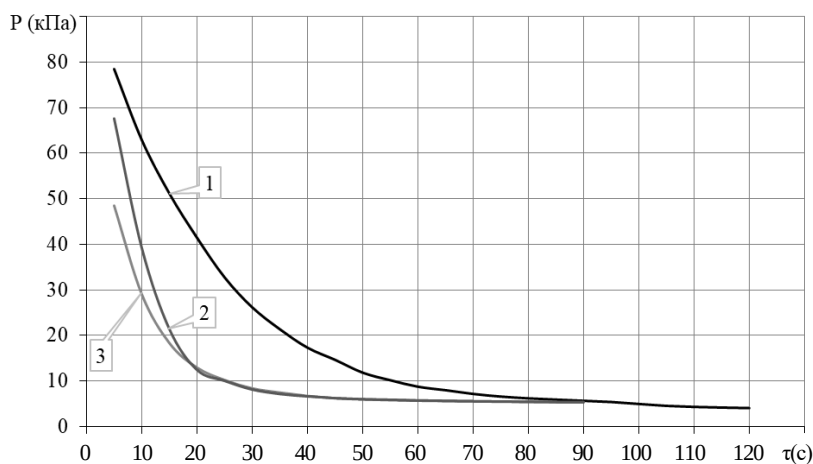


Рис. 3. Криві створення розрідження у вакуум-камері

З метою оптимізації процесу вакуумного охолодження було визначено пропускну здатність скоринки батона ($l = 0,32 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), розраховано площу поверхні батона ($F = 0,091 \text{ м}^2$), а також визначено час, за який утворена в процесі вакуумного охолодження пара ($V = 0,444 \text{ м}^3$) може пройти через скоринку батона ($\tau = 21 \text{ с}$) (Козак, & Теличкун, 2023).

Отримані в результаті досліджень і розрахунків дані свідчать, що експериментально знайдений режим вакуумного охолодження батона (рис. 3 крива 1) можливо інтенсифікувати. Але для розрахунку такого режиму, за якого можна максимально швидко охолодити батон вакуумним способом, не зіпсувавши його, необхідно визначити реологічні властивості м'якушки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова спільнота приділяє значну увагу проблематиці вакуумного охолодження харчової продукції, що відображено у великій кількості наукових досліджень, проведених протягом декількох десятиліть. Холодильна промисловість часто використовує метод охолодження за рахунок випаровування рідини (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018). Температура про-

дукту знижується під час вакуумного охолодження за рахунок випаровування води з нього, яка переходить у паровий стан. (Everington, 2003). Зазвичай, вода закипає за температури 100 °C та атмосферного тиску (101,325 кПа), під час переходу з рідкого агрегатного стану в газоподібний. Під час цього процесу вода поглинає таку кількість тепла, що не дає їй підвищити температуру вище зазначеної (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019). Зниження тиску у вакуумній камері зменшує температуру кипіння води в продукті, що, у свою чергу, сприяє ефекту охолодження. Це призводить до скорочення тривалості процесу охолодження, але збільшує відсоток усихання готового продукту приблизно в 1,5—2 рази (Ajani, Zhu, & Sun, 2023; Клапатюк, Ковальов, & Федорів, 2014). У фармацевтичній промисловості вакуумвипарний апарат застосовують для концентрування розчинів, що киплять за високої температури, з метою економії енергоносіїв і зменшення часу проведення технологічного процесу (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018).

Вакуумний спосіб охолодження широко використовують для щойно зібраної на полі зелені та свіжих овочів у США, Європі та Китаї (Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019; Zhu, Li, & Sun, 2021). Унаслідок відбору тепла випаровуванням води з низького тиску температура щойно зібраної продукції може бути ефективно знижена з 28 °C до 2 °C. Процес охолодження проводять порційно, тривалість охолодження однієї порції 15—30 хв, причому типові обладнання здатне обробити за раз кілька тонн продукту, розміщеного, як правило, на піддонах або візках (Guo, Song, & Liu, 2018).

Втрата води на рівні 1% призводить до охолодження продукту на 6 °C. Для вакуумного способу охолодження продукт поміщають у сталеву камеру, і вакуумні насоси знижують тиск до 0,6 кПа (Guo, Song, Song, & Liu, 2018). Вода закипає в умовах тиску від 2,6 до 4 кПа залежно від початкової температури. Це призводить до швидкого випаровування води та швидкого охолодження. У кінці циклу охолодження тиск дорівнює 0,6 кПа, а вода кипить за температури 0 °C (Peng, Cheng, 2017).

Якщо продукт витримується за такого тиску досить довго, він може охолонути до 0 °C. Втрати маси продукту, що охолоджується, становить від 2 до 4% ваги залежно від початкової температури. Обприскування водою до початку охолодження зменшує втрати води продуктом (Zhang et al., 2014).

Мета дослідження: визначення реологічних властивостей м'якушки батона з метою розрахунку й обґрунтування режимних параметрів вакуумного охолодження батона з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг.

Матеріали і методи. Досліджували м'якушку батона з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг. Для визначення реологічних властивостей м'якушки використовували напівавтоматичний пенетрометр марки АП 4/1 з плоским індентором (рис. 4).

Дослідження проводились в умовах виробництва зі свіжовипеченим батонем, взятим з поду печі, дотримуючись таких кроків: за допомогою ножа з батона вирізали зразок м'якушки розмірами 30 мм у висоту, ширину та довжину. Цей зразок розміщували на платформі та піднімали до поверхні індентора за допомогою піднімального гвинта. Під час досліджень стало очевидно, що реологічні характеристики м'якушки значною мірою залежать від температури. Для кожного значення

температури м'якушки брали по три зразки, і для кожного дослідів використовувався новий зразок.

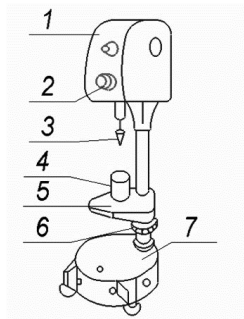


Рис. 4. Пенетромтр моделі АП 4/1: 1 — вимірювальна головка; 2 — показчик шкали; 3 — індентор; 4 — зразок; 5 — платформа для зразка; 6 — гайка для підведення платформи із зразком до індентора; 7 — основа

Аналіз отриманих дослідних даних виконували, спираючись на наукові праці П. А. Ребіндера та інших дослідників, які вивчали реологічні властивості низькомодульних матеріалів компресійним методом. На відрізку ОА (рис. 5), матеріал підкоряється закону Гука. Це означає, що деформація матеріалу пропорційна прикладеному напруженню.

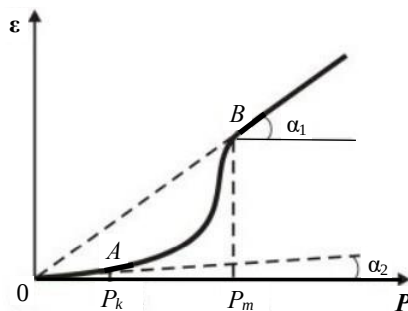


Рис. 5. Узагальнений графік деформування низькомодульних матеріалів під час компресійних досліджень реологічних властивостей

Напруження P_k вказує на початок руйнування структури. За подальшого зростання напруження на ділянці АВ (рис. 5) крива втрачає лінійний характер, що вказує на часткове руйнування структури та появу пластичної деформації. У точці В кривій деформації структура системи практично повністю руйнується. Напруження, що відповідає цій точці, називається граничним напруженням зсуву P_m (границею міцності матеріалу). За P_m , коли структура руйнується, матеріал деформується відповідно до закону Гука.

Для наближеного розрахунку тиску, що утворюється всередині батона під час процесу вакуумного охолодження, було використано газовий закон Бойля-Маріотта, згідно з яким за постійної кількості газу його тиск і об'єм зворотно пропорційні:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2, \quad (1)$$

де P_1 — початковий тиск всередині батона (Па); V_1 — початковий об'єм газу в середині батона (м^3); P_2 — тиск всередині батона під час вакуумного охолодження (Па); V_2 — об'єм газу всередині батона під час вакуумного охолодження (м^3).

Потік газу через скоринку батона описується рівнянням:

$$J=(PD)/L, \quad (2)$$

де J — потік газу через скоринку батона ($\text{м}^3/\text{с}$); P — різниця тиску між внутрішнім і зовнішнім середовищами (тобто $P=P_1-P_2$); D — газопроникність скоринки батона ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); L — товщина скоринки батона (м).

Тоді градієнт тиску між середовищем всередині батона та середовищем вакуум-камери P_2 .

З рівняння проникності-концентрації ми можемо виразити різницю тисків P :

$$P=(JL)/D. \quad (3)$$

Підставляючи це значення різниці тисків P у закон Бойля-Маріотта, отримуємо:

$$P_1V_1=(P_1-P)V_2 \quad (4)$$

Звідки отримуємо:

$$P_1V_1=(P_1-(JL)/D)V_2. \quad (5)$$

Оскільки об'єм газу всередині батона не змінюється під час вакуумного охолодження, то можна припустити, що $V_1 \approx V_2$. Тоді рівняння спрощується до:

$$P_1 \approx P_2 + (JL)/D. \quad (6)$$

Звідси ми можемо вивести значення тиску в батоні P_2 , що виникає під час вакуумного охолодження:

$$P_2 = P_1 - (JL)/D. \quad (7)$$

Викладення основних результатів дослідження. В результаті проведених досліджень з визначення реологічних властивостей м'якушки батона було отримано типові криві залежності деформації зразка від прикладеного напруження при визначенні реологічних властивостей матеріалів компресійним методом (Ajani, Zhu, & Sun, 2022).

Деформаційні криві зразків було оброблено таким чином: всі точки, отримані за відповідної температури, були впорядковані в точкові діаграми, після чого була побудована лінія тренду (рис. 6). За допомогою описаної вище методики визначення реологічних властивостей матеріалу компресійним методом була встановлена границя міцності м'якушки батона при відповідних температурах.

Під час подальшого аналізу дослідних даних на основі попередніх результатів ми побудували графік, що відображає залежність границі міцності від температури, та виявили відповідну закономірність (рис. 7).

Аналізуючи графік на рис. 7, можна стверджувати, що значення границі міцності м'якушки батона прямо пропорційна температурі.

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

$$\sigma = 30t + 4500, \quad (8)$$

де t — температура в (°C); σ — границя міцності м'якушки батона в (Па).

На основі отриманих даних з дослідження реологічних властивостей м'якушки батона та наших досліджень процесу вакуумного охолодження батона і досліджень газової проникності скоринки батона ми розраховували режим вакуумного охолодження батона, за якого градієнт тиску між середовищем всередині батона

та середовищем у вакуумній камері не перевищує границі міцності м'якушки батона (рис. 8).

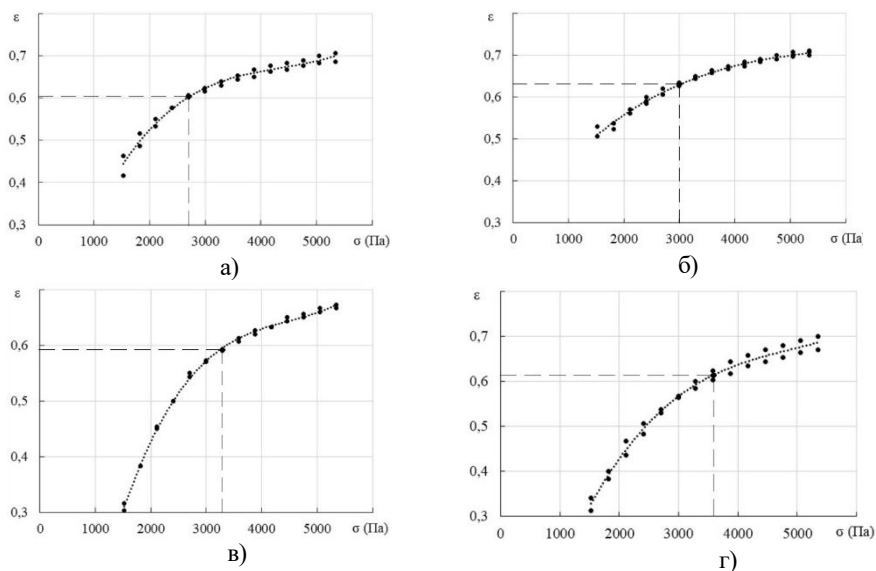


Рис. 6. Криві залежності деформації зразка від прикладеного напруження отримані в ході опрацювання досліджень реологічних властивостей м'якушки батона: а) за температури зразка 60 °С, границя міцності 2700 Па; б) за температури зразка 50 °С, границя міцності 3000 Па; в) за температури зразка 40 °С, границя міцності 3300 Па; г) за температури зразка 30 °С, границя міцності 3600 Па

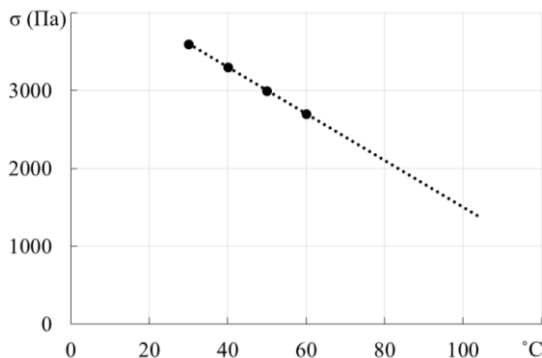


Рис. 7. Графік залежності границі міцності від температури

Опираючись на дослідні дані, можна стверджувати, що максимальна швидкість 4,5 кПа/с є оптимальною. Реологічні властивості та газова проникність скоринки ($0,32 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) дають змогу скоротити час охолодження батона з декількох годин до 66 с (рис. 8, крива 2). Збільшення швидкості зниження тиску у вакуумній камері є недоцільним, оскільки це призведе до утворення надлишкового градієнту тиску між середовищем всередині батона та середовищем у вакуумній камері, який

перевищить границю міцності м'якушки. Це, у свою чергу, призведе до відриву м'якушки від нижньої скоринки, що не відповідає вимогам якості згідно з ДСТУ.

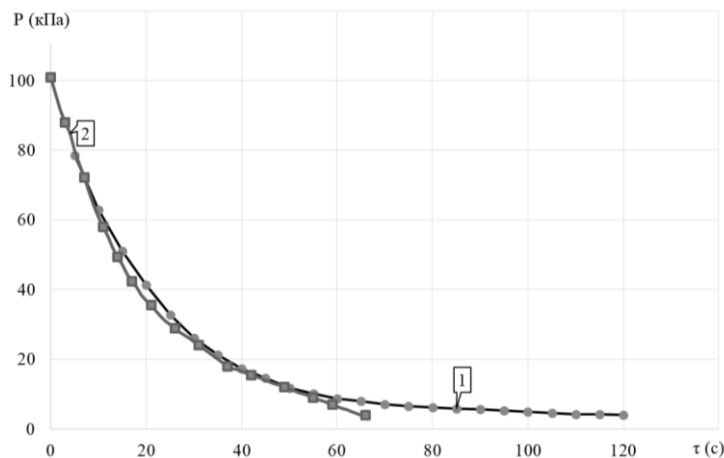


Рис. 8. Криві створення розрідження у вакуум-камері: 1 — режим вакуумного способу охолодження батона, знайдений дослідним шляхом; 2 — розрахунковий режим вакуумного способу охолодження батона

Висновки

1. Розроблено методику проведення досліджень з визначення реологічних властивостей м'якушки хлібобулочних виробів.

2. Визначено значення границі міцності м'якушки батона та залежність зміни її значення від температури. При температурі 100 °С границя міцності становить 1500 Па, а при 30 °С — 3600 Па. Цю залежність можна виразити у вигляді рівняння: $\sigma = 30t + 4500$, де t — температура (°С); σ — границя міцності м'якушки батона (Па).

3. Розраховано режим зміни тиску в часі у вакуум-камері, при якому градієнт тиску між парою у виробі, що охолоджується, та навколишнім середовищем не перевищує значення границі міцності при відповідній температурі. Максимальна швидкість зміни тиску в часі дорівнює 4,5 кПа/с, а тривалість процесу вакуумного охолодження батона за такого режиму складає 66 с.

Література

Козак, О. С., Теличкун, В. І. (2023). Визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона в процесі вакуумного охолодження. *Харчова промисловість*, 33—34, 62—70. Взято з: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/d7802b3b-c9a8-4ac2-8888-e1899063439d>.

Клапатюк, М., Ковальов, О., Федорів, В. (2014). Zeovac вакуумне охолодження — технологія майбутнього. *Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 80 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 10—11 квітня К.: НУХТ, 2014. Ч. 2. С. 28—30. Взято з https://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/22290/2/80_2.pdf.*

Ajani, C. K., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2022). In situ investigation of cellular water transport and morphological changes during vacuum cooling of steamed breads. *Food Chemistry*, 381, 132211. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132211>.

- Ajani, C. K., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2023). Shrinkage during vacuum cooling of porous foods: Conjugate mechanistic modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 337, 111220. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111220>.
- Everington, D. (2003). Vacuum technology for food processing. *Food Technology International Europe*, 5, 71—74.
- Gao, J., Wang, Y., Dong, Z., & Zhou, W. (2018). Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 53, 858—872. Взято з: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.
- Guo, Z., Song X., Song, Z., Liu, B. (2018). An improved method of immersion vacuum cooling for small cooked pork: Bubbling Vacuum Cooling. *International Journal of Food Science and Technology*, 53, 2748—2753. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1111/ijfs.13918.
- Kinner, M., Rüegg, R., Weber, C., Buchli, J., Durrer, L., Müller, N. (2021). Impact of selected baking and vacuum cooling parameters on the quality of toast bread. *J. Food Sci. Technol.*, 58, 4578—4586. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04945-x>.
- McDonald, K. (2001). The formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling. *Journal of Food Engineering*, 47, 175—183. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00111-4).
- Primo-Martin, C., Beukelaer, H., Hamer, R. J., Vliet, T. (2008). Fracture behaviour of bread crust: Effect of bread cooling conditions. *Journal of Food Engineering*, 89, 285—290. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.005>.
- Peng, Y., Cheng, W. (2017). Experimental investigation on the effect of heat transfer enhancement of vacuum spray flash evaporation cooling using Al₂O₃-water nanofluid. *Energy Procedia*, 142, 3766—3773. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.274>.
- Wang, N., Kan, A., Huang, Z., Lu, J. (2020). CFD simulation of heat and mass transfer through cylindrical *Zizania latifolia* during vacuum cooling. *Heat Mass Transfer*, 56, 627—637. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02736-5>.
- Zhu, Z., Li, Y., Sun, D. W., & Wang, H. W. (2018). Developments of mathematical models for simulating vacuum cooling processes for food products — a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(5), 715—727. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1080/10408398.2018.1490696.
- Zhang, Z., Zhang, Y., Su, T., Zhang, W., Zhao, L., Li, X. (2014). Heat and Mass Transfer of Vacuum Cooling for Porous Foods-Parameter Sensitivity Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 8 pages. Взято з: <https://doi.org/10.1155/2014/613028>.
- Zhu, Z., Li, T., & Sun, D. W. (2020). Pressure-related cooling and freezing techniques for the food industry: fundamentals and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(17), 2793—2808. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1080/10408398.2020.1841729.