

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-17>

УДК 631.234:635.64+578

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

В. Ф. Ялпачик, канд. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: nadiia.palianychka@tsatu.edu.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІННОВАЦІЙНОГО СПОСОБУ ЗАМОРОЖЕННЯ ТА ДЕФРОСТАЦІЇ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

*Анотація.* У роботі наведено результати експериментального дослідження процесів заморожування й дефростації плодоовочевої сировини в умовах підвищеного тиску. Установлено, що під час заморожування напружений стан клітинної стінки характеризується виникненням розтягувальних напруг, величина яких змінюється за гіперболічною залежністю по всій поверхні. З метою зниження максимальних розтягувальних напружень обґрунтовано необхідність створення зовнішнього навантаження на циліндричну оболонку, величина якого повинна відповідати гідростатичному тиску всередині клітини. За результатами проведеної роботи визначено оптимальні значення тиску, за яких доцільно здійснювати процеси заморожування та подальшої дефростації.

Отримані експериментальні дані засвідчують ефективність запропонованого способу й підтверджують обґрунтованість застосування процесів заморожування та дефростації в умовах підвищеного тиску.

*Ключові слова:* заморожування, дефростація, гідростатичний тиск, напруга, осмотичний тиск, клітина.

*Постановка проблеми.* Одним із дієвих способів мінімізації втрат сільськогосподарської продукції й, відповідно, нарощування продовольчих ресурсів є розвиток виробництва заморожених харчових продуктів [1, 2].

Застосування заморожування до свіжої сировини дає можливість максимально зберегти її біологічну та вітамінну цінність, а також природну активність компонентів як рослинного, так і тваринного походження. Крім того, така технологія забезпечує використання цієї сировини для виготовлення харчових продуктів упродовж осіннього, зимового й весняного періодів. Питання збереження природних характеристик і харчової цінності плодоовочевої продукції тісно пов'язане з правильним вибором способу її розморожування. Щоб мінімізувати небажані зміни, що виникають у заморожених продуктах під час дефростації, необхідно враховувати особливості перерозподілу вологи. Зокрема, важливо забезпечити поступове повернення води з міжклітинного простору до клітин, куди вона перемістилася в процесі заморожування. Саме контроль цього процесу сприяє збереженню структурної цілісності тканин і якості продукту. Разом із тим установлено, що наявні методи зберігання продукції в замороженому стані неповною мірою відповідають сучасним вимогам якості [3]. Після проведення дефростації спостерігається зморщування плодів, унаслідок чого вони втрачають привабливий товарний вигляд. У зв'язку з цим удосконалення технологічних підходів до процесів заморожування та подальшого розморожування набуває особливої актуальності.

*Аналіз останніх досліджень.* Упродовж останніх років у сфері заморожування та дефростації плодоовочевої сировини сформовано вагомий науковий доробок, що охоплює як теоретичні засади, так і практичні аспекти реалізації процесів [3; 4; 5; 6; 7].

Підбір оптимальних режимів заморожування визначається необхідністю створення таких умов, за яких мінімізується руйнівний вплив осмотичного тиску води. Важливим є обмеження



деформацій біологічного об'єкта, спричинених ростом кристалів льоду, а також забезпечення достатнього рівня зневоднення тканин. Саме такий ступінь дегідратації дає змогу запобігти внутрішньоклітинній кристалізації. Клітинні оболонки чинять вплив на воду, що проявляється у виникненні напруженого стану, зумовленого силами поверхневого натягу в системі «повітря – вода», а також силами адгезійної взаємодії в системі «тверда фаза – вода».

Якби клітинні стінки характеризувалися абсолютно пружними властивостями, то після процесу дефростації плід повністю відновлював би свою початкову форму. Однак у реальних умовах клітинна оболонка не є ідеально пружною, здатна до залишкових деформацій і розтягування, що призводить до зморщування ягід після відтаювання.

Таким чином, важливим науково-практичним завданням є раціональний вибір параметрів заморожування та дефростації плодів, овочів і ягід з урахуванням їхніх фізико-механічних і біохімічних характеристик. Оптимізація цих режимів має бути спрямована на отримання продукції з високими споживчими показниками та збереженою біологічною цінністю, придатною до безпосереднього споживання після розморожування.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою дослідження є обґрунтування й експериментальне визначення раціонального способу заморожування та подальшої дефростації плодів, за якого забезпечується стан динамічної рівноваги. Такий підхід передбачає здійснення процесу в умовах гідростатичного тиску, величина якого відповідає внутрішньому тиску в тканинах плодів.

*Основна частина.* Специфіка поведінки плодоовочевої сировини під час заморожування визначається фазовим переходом води у твердий стан, що зумовлює зростання концентрації розчинених компонентів у залишковій рідкій фазі. Формування кристалів льоду спричиняє трансформацію теплофізичних параметрів плодів та овочів, унаслідок чого відбуваються зміни їх фізико-механічних, біохімічних і морфологічних характеристик [8].

Розглянемо явища, що виникають у клітині під час заморожування, на прикладі винограду [3] і проаналізуємо напружений стан його оболонки. Із цією метою в першому наближенні застосуємо окремий випадок розрахунку циліндричної оболонки – задачу Ляме [3] – за умови навантаження лише внутрішнім тиском (рис. 1):

$$\sigma_t = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left( 1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left( 1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (2)$$

де  $\sigma_t$  – тангенціальна (окружна) напруга;

$\sigma_r$  – радіальна напруга;

$p$  – величина внутрішнього тиску;

$r_1$  – радіус внутрішньої поверхні оболонки;

$r_2$  – радіус її зовнішньої поверхні;

$r$  – поточна відстань від осі симетрії до розглядуваної точки.

З аналізу співвідношень (1) і (2) випливає, що радіальні напруження  $\sigma_r$  в усіх точках стінки мають стискуючий характер, тоді як окружні напруження  $\sigma_t$  є розтягувальними.

Розподіл напружень по товщині оболонки відбувається за гіперболічною залежністю.

Згідно з даними [8], руйнування клітин рослинної сировини в процесі заморожування зумовлене виникненням внутрішніх напружень, що формуються під час фазового переходу рідини в твердий стан. Унаслідок наявності температурного градієнта в різних зонах продукту одночасно перебігають відмінні за характером процеси.

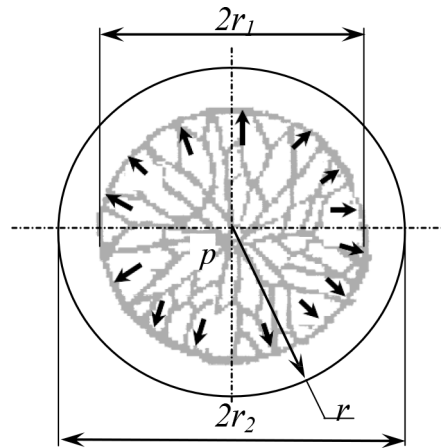


Рис. 1. Схема дії внутрішнього тиску на ягоду винограду

Поверхневі шари, температура яких опускається значно нижче за криоскопічну точку, зазнають стискання, тоді як внутрішні об'єми збільшуються (приблизно до 9 %) через кристалізацію води. Така різниця деформацій спричиняє розвиток внутрішнього тиску між шарами, який зростає зі збільшенням інтенсивності тепловідведення. Коли напруження в приповерхневих шарах перевищують межу міцності тканини, відбувається розтріскування продукту.

Для зниження максимальних окружних розтягувальних напружень  $\sigma_t$  доцільно створити додаткове навантаження на циліндричну оболонку у вигляді зовнішнього тиску.

Проаналізуємо, як змінюються напруження  $\sigma_t$  і  $\sigma_r$  за наявності зовнішнього тиску. У такому разі залежності для визначення напружень набувають вигляду:

$$\sigma_r = -\frac{r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right); \quad (3)$$

$$\sigma_t = -\frac{r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right). \quad (4)$$

У цьому випадку обидва напруження мають стискуючий характер, причому за абсолютним значенням  $\sigma_t$  перевищує  $\sigma_r$ .

На внутрішній поверхні циліндра отримаємо:

$$\begin{aligned} (\sigma_r)_{r=r_1} &= 0; \\ (\sigma_t)_{r=r_1} &= -\frac{2}{1-k^2} \cdot p. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, результати виконаного теоретичного аналізу свідчать про те, що процес заморожування ягід доцільно здійснювати за умови прикладання зовнішнього тиску, величина якого відповідає гідростатичному тиску всередині клітини.

Гідростатичний тиск відіграє важливу роль у збереженні форми плоду, а також впливає на процеси переміщення води й розчинення речовин у клітинному середовищі. Наявність такого тиску підтверджується тим, що при механічному пошкодженні плоду (зокрема проколюванні) з нього інтенсивно виділяється сік. За умови ідеальної пружності клітинних стінок після дефростації плід повністю відновлював би свій початковий стан. Однак у реальних умовах оболонка клітини не має абсолютно пружних властивостей, здатна до розтягування й залишкових деформацій, що зумовлює зморщування плодів після розморожування.

Отже, з метою запобігання зазначеним негативним явищам під час заморожування й подальшої дефростації плодів необхідно забезпечувати умови динамічної рівноваги. Це передбачає

здійснення процесу за такого гідростатичного тиску, величина якого відповідає внутрішньому тиску в тканинах плодів.

Для розрахунку гідростатичного тиску в плодовій сировині попередньо варто визначити значення осмотичного тиску.

Величина осмотичного тиску в плодах знаходиться в межах від 0,9 МПа (для томатів) до 3,8 МПа (для винограду) [3].

Осмотичні явища відіграють визначальну роль у перебігу біологічних процесів. Безперервний осмос усередині клітин сприяє формуванню підвищеного гідростатичного тиску в тканинах плодів, що забезпечує їхню міцність і пружність. Значення врівноваженого осмотичного тиску клітинного соку становить 405–2026 кПа [8].

Установлено, що величина осмотичного тиску в клітинах овочевої та плодової сировини, зокрема винограду, змінюється в діапазоні 0,08–0,49 МПа.

Також відомо, що оптимальне зберігання плодів і ягід здійснюється за температури  $-20^{\circ}\text{C}$ . Тому на графіку залежності коефіцієнта теплопровідності від температури з точки, що відповідає значенню  $-20^{\circ}\text{C}$ , проводять перпендикуляр до перетину з кривою осмотичного тиску для конкретного виду сировини (рис. 2). Отримана точка перетину визначає величину гідростатичного тиску, тобто той тиск, за якого доцільно здійснювати процес заморожування продукції.

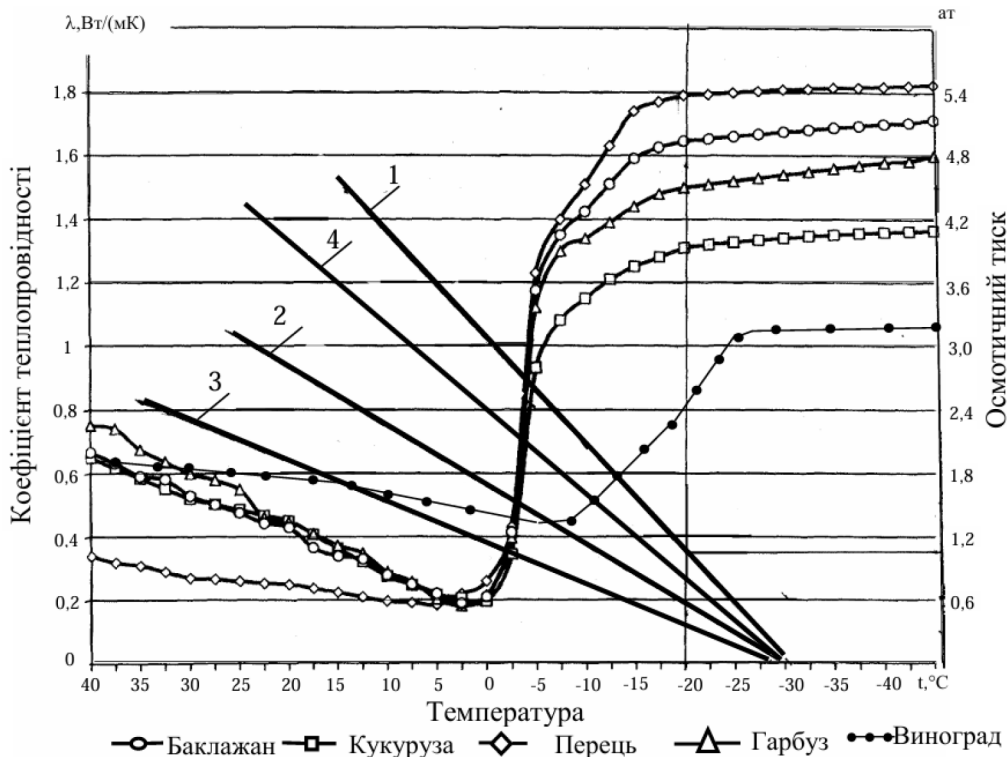


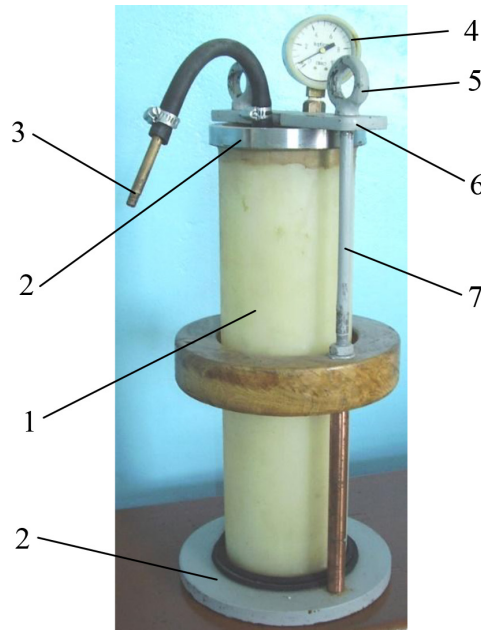
Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта теплопровідності й осмотичного тиску від температури:  
1 – гарбуз; 2 – кукурудза; 3 – баклажан; 4 – перець

З наведеного графічного матеріалу випливає, що процеси заморожування та подальшої дефростації доцільно здійснювати за таких значень тиску: для баклажанів – 0,03 МПа, для кукурудзи – 0,045 МПа, для перцю – 0,067 МПа, для винограду – 0,07 МПа.

З метою перевірки висунутої гіпотези виконано експериментальне дослідження процесу дефростації плодоовочевої сировини в умовах підвищеного тиску [9; 10]. Для реалізації дослідів сконструйовано та виготовлено спеціальну камеру (рис. 3). Конструкція установки включає пластмасовий циліндр, верхню й нижню кришки, золотниковий механізм і манометр. Нижня

кришка з ущільнювальним елементом герметично фіксується за допомогою шпильок. Верхня кришка виконана знімною; її притискання до циліндра здійснюється через ущільнювач за допомогою притискної пластини та гайок, що забезпечує герметичність системи під час роботи.

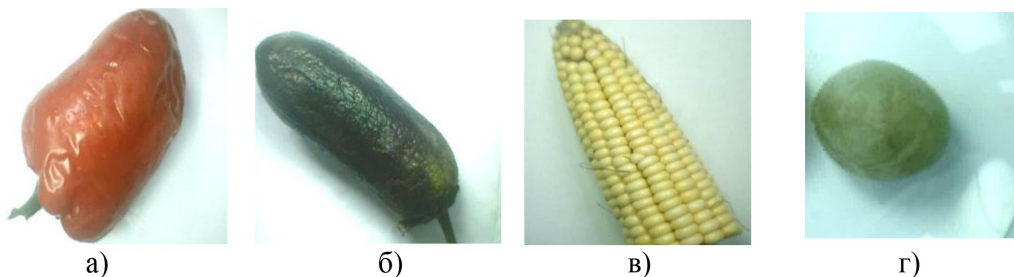
Процес дефростації в умовах підвищеного тиску здійснювали за такою методикою. У циліндр 1 заливали воду температурою 25–28 °С. Далі за допомогою насоса в камері створювали надлишковий тиск, величина якого відповідала внутрішньому гідростатичному тиску конкретного плоду. Заданий рівень тиску підтримували до моменту, коли температура в центральній частині зразка досягала 15 °С. Після цього тиск поступово знижували, демонтували верхню кришку камери та вилучали плоди для подальшого аналізу.



**Рис. 3. Експериментальна камера для дослідження процесу дефростації плодів під тиском:**  
1 – циліндр; 2 – верхня та нижня кришки; 3 – золотниковий механізм; 4 – манометр;  
5 – притискні гайки; 6 – притискна пластина; 7 – стяжна шпилька

*Результати експериментів засвідчили, що плоди, які піддавалися заморожуванню та подальшій дефростації в умовах підвищеного тиску, характеризуються суттєво кращими зовнішніми показниками (рис. 4) порівняно з тими зразками, які оброблялися за традиційних умов.*

Після проведення дефростації в умовах підвищеного тиску плодоовочева продукція зберегла характерне природне забарвлення й форму, а також відзначалася щільною консистенцією. Крім того, плоди перцю вирізнялися добре збереженим і чітко вираженим ароматом.



**Рис. 4. Плодоовочева сировина після проведення дефростації: а – перець; б – баклажан;  
в – кукурудза; г – виноград**



Отже, результати досліджень засвідчили, що застосування способу заморожування та подальшої дефростації за умови створення тиску, еквівалентного гідростатичному тиску в клітині, забезпечує отримання продукції високої якості. Така сировина навіть за тривалого зберігання демонструє мінімальні зміни фізико-механічних і біохімічних показників.

**Висновки.** Подовження терміну зберігання плодоовочевої продукції залишається важливим науково-практичним завданням, особливо коли йдеться про забезпечення її споживання від урожаю до врожаю, а в окремих випадках і протягом тривалішого періоду. Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання цього питання є застосування заморожування за умови максимального збереження маси та якісних показників продукції. Водночас аналіз свідчить, що кінцева якість продукту після заморожування значною мірою залежить від правильно обраного режиму дефростації. У разі недотримання оптимальних умов плоди та ягоди часто втрачають не лише привабливий зовнішній вигляд, а й смакові властивості. Дослідження засвідчило, що найбільш доцільним напрямом у цьому аспекті є застосування технології заморожування та подальшої дефростації плодів та овочів за умови створення тиску, еквівалентного гідростатичному тиску всередині клітини. За результатами експериментальної роботи визначено оптимальні значення тиску для здійснення цих процесів: для баклажанів – 0,03 МПа, для кукурудзи – 0,045 МПа, для перцю – 0,067 МПа, для винограду – 0,07 МПа. Експериментальні випробування засвідчили, що зразки, які піддавалися заморожуванню й подальшій дефростації за умов прикладення тиску, суттєво перевищують за зовнішніми показниками продукцію, оброблену традиційним способом. Такі плоди зберегли природне забарвлення та форму, характеризувалися щільною консистенцією, а перець, окрім цього, мав виразний, притаманний йому аромат. Таким чином, застосування технології заморожування й розморожування за тиску, еквівалентного гідростатичному тиску в клітині, забезпечує отримання високоякісної продукції, яка навіть у разі тривалого зберігання зазнає мінімальних змін фізико-механічних і біохімічних властивостей.

У подальшій роботі передбачається здійснення досліджень запропонованої технології заморожування та дефростації в промислових умовах. Метою таких випробувань є оцінювання її ефективності й надійності при переробці значних обсягів продукції, а також перевірка стабільності показників якості за тривалих строків зберігання.

#### Список використаних джерел

1. Grover Y. Recent developments in freezing of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*. 2023. DOI: 10.1111/1750-3841.16810
2. Кюрчев С. В., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О. Дослідження холоду при зберіганні ягід. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, Т. 2. С. 46–53.
3. Ялпачик В. Ф. Розвиток наукових основ енергозберігаючих технологій заморожування та низькотемпературного зберігання плодоовочевої сировини : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.18.13 / Одес. держ. акад. холоду. Одеса, 2012. 32 с.
4. Koç G. Ç., Karabacak A. Ö., Süfer Ö. Adal S., Çelebi Y., Kiyak B.D., Öztekin S. Thawing frozen foods: a comparative review of traditional and innovative methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. P. 1–30.
5. Neri L., Faieta M., Mattia C. D., Sacchetti G., Mastrocola D., Pittia P. Antioxidant Activity in Frozen Plant Foods: Effect of Cryoprotectants, Freezing Process and Frozen Storage. *Foods*. 2020. Dec 17. № 9(12). P. 1886. DOI: 10.3390/foods9121886
6. Li T., Chen W., Huang P. Impact of on-site cold storage on post-harvest losses in fruit supply chains. *International Journal of Refrigeration*. 2025. 146420.
7. Ivanova I., Serdiuk M., Malkina V., Tonkha O., Tsyž O., Shkinder-Barmina A., Verkholtantseva V., Palianychka N., Mushtruk M., Rozbytska T. Factorial analysis of taste quality and technological properties of cherry fruits depending on weather factors. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. Slovakia*. 2022. Vol. 16. P. 341–355.



8. Otero L. Application of high pressure processing in freezing and thawing processes. *Non-thermal Food Processing Operations*. 2023. P. 359–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818717-3.00005-6>
9. Тарасенко В. Г. Вдосконалення обладнання для заморожування харчових продуктів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ імені Дмитра Моторного*. Мелітополь : ТДАТУ імені Дмитра Моторного, 2019. Вип. 19, Т. 2. С. 130–136. DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-130-136
10. Ялпачик В. Ф. Нові методи контролю якості плодів при зберіганні холодом. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2013. Вип. 13. Т. 7. С. 3–10.

*Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

*Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)*



**N. Palianychka, V. Yalpachyk, O. Prokopenko**

*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

## **EFFICIENCY OF AN INNOVATIVE FREEZING AND DEFROSTING METHOD FOR FRUITS AND VEGETABLES**

### ***Summary***

Extending the shelf life of fruit and vegetable products remains an important scientific and practical task, particularly in ensuring their consumption from harvest to harvest and, in some cases, over even longer periods. Freezing is considered one of the most promising approaches to addressing this issue. However, the final product quality after freezing largely depends on a properly selected defrosting regime and the conditions under which thawing is carried out. This study presents the results of an experimental investigation of the freezing and defrosting of fruit and vegetable raw materials under elevated pressure. The application of pressure improves product quality by minimizing cellular damage, preserving gases dissolved in the cell sap, and facilitating the recovery of the turgor state of plant tissues after thawing. It was established that during freezing the stress state of the cell wall is characterized by tensile stresses, whose magnitude changes according to a hyperbolic relationship over the entire cell surface. To reduce the maximum tensile stresses, the necessity of applying an external load to the cylindrical shell was substantiated; its value should correspond to the hydrostatic pressure inside the cell. Optimal pressure values for freezing and subsequent defrosting were determined: eggplants – 0.03 MPa, corn – 0.045 MPa, peppers – 0.067 MPa, and grapes – 0.07 MPa. Experimental tests showed that samples processed under applied pressure clearly outperformed those treated by conventional methods in external quality indicators, confirming the feasibility of freezing and thawing under elevated-pressure conditions. In particular, pressure-treated samples retained a more intact surface, firmer texture, and better overall appearance after defrosting too.

**Keywords:** freezing, defrosting, hydrostatic pressure, tension, osmotic pressure, temperature, cell, fruit and vegetable products.