УДК 641.437.075.8

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАЦІЇ У ЯГОДІ ВИНОГРАДУ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ

Малкіна В.М. д.т.н.,
Ялпачик В.Ф. к.т.н., докторант

Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.(0619) 42-13-06

***Анотація* – дану роботу присвячено розробці заходів спрямованих на поліпшення товарного виду плодоовочевої продукції при зберіганні в замороженому стані. У статті представлені теоретичні дослідження, які дозволяють зробити висновок, що заморожування та дефростацію слід проводити за таких умов, коли внутрішній тиск дорівнює зовнішньому тиску.**

***Ключові слова* – модель плода, оболонка, пружне тіло, нормальне напруження, внутрішній тиск, зовнішній тиск, напружено-деформований стан.**

Постановка проблеми. В даний час якість і кількість втрати плодоовочевої продукції в період зберігання по приблизним підрахункам складають до 25% зібраного врожаю. Тому перед аграріями поставлена задача забезпечення населення свіжими плодами і зберігання цілющих властивостей їх не тільки в літньо - осінній але й у зимовий період. Збільшення терміну зберігання плодів можливо за рахунок його низькотемпературного заморожування.

Аналіз останніх досліджень. Проведені дослідження з вибору режимів заморожування сільськогосподарської продукції, з метою тривалого зберігання в замороженому виді, показали, що процес заморожування варто проводити в два етапи. [1]

Спочатку продукцію слід охолоджувати до 5-7 °С, а потім у морозильній камері заморожувати до мінус 20 °С і залишати на тривале зберігання. Причому, як показали дослідження [1] фізико-механічні і біохімічні властивості продукції змінювались незначно. Після дефростації в воді плоди трохи змінювали свій вид, вони мали морщини, підсилювалась соковіддача. На наш погляд, це можна пояснити неправильним вибором режимів заморожування та дефростації.

Формування цілей статті. Метою даної роботи є розробка способу заморожування та дефростації плодів на прикладі ягід винограду при якому не буде відбуватися клітинних структур плоду.

Основна частина. Моделювання процесу деформації і напруги в ягоді винограду розглянемо з позиції теорії положистих оболонок двоякої кривизни, вважаючи модель плоду як оболонку, заповнену однорідною гетерогенною сумішшю.

У першому наближенні розглянемо модель плоду як оболонку, заповнену однорідною гетерогенною сумішшю. На оболонку діють сили $P_в$ (Рис.1), що рівномірно розподілені по поверхні оболонки, при чому ці сили перевищують сили атмосферного тиску, що діють на зовнішню сторону оболонки. У тім, що внутрішні сили перевищують зовнішні, свідчить той факт, що плід свою форму не змінює, тобто можемо записати

$$P_в > P_{ат.}$$

Будь-який плід складається з води і сухих речовин, причому вода складає від 83 до 96%.

Відомо, що при заморожуванні обсяг води збільшується від 6 до 10% [2,3], отже збільшується внутрішній тиск на стінки оболонки.

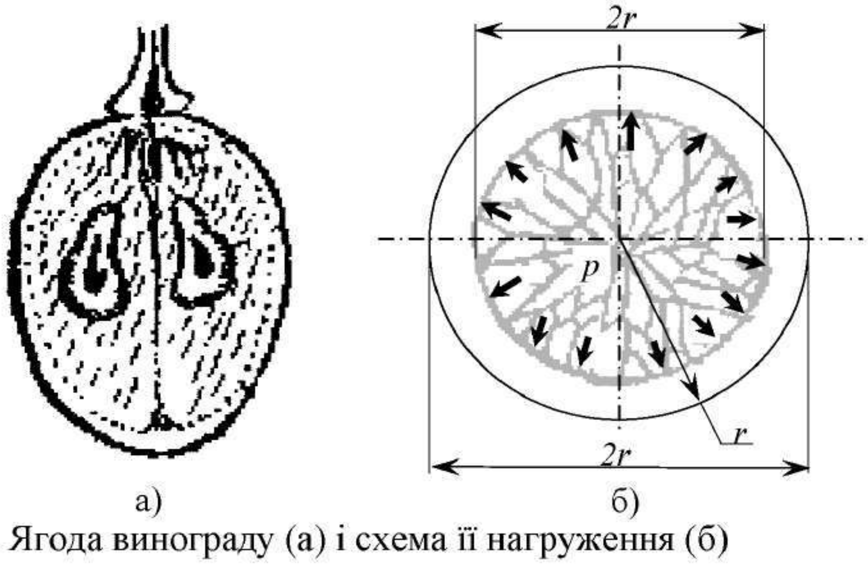

Рис. 1. Ягода винограду (а) і схема її нагруження (б)

З погляду теорії оболонок (ТО) ягоду будемо розглядати як пружне тіло, обмежене двома сферами, відстань між якими - товщина шкірки h=0,1 мм. Серединна поверхня оболонки-ягоди - сфера радіуса R_c=10 мм, як видно h істотно менше R_c.

Так як відношення товщини оболонки до найменшого радіуса кривизни (який збігається з радіусом сфери R) $\frac{h}{R} = \frac{0,1}{10} = 0,01$, то розглянуту оболонку відносимо до класу тонких.

Припустимо, що матеріал оболонки ізотропний і підкоряється законові Гука (що можна скласти з експериментальних досліджень).

Якщо рівняння серединної поверхні оболонки в декартової системі координат [4,5].

$$\eth^2 + \acute{o}^2 + z^2 = R^2,$$

то її кривизни

$k_x = \dfrac{\partial^2 z}{\partial \eth^2}$ - кривизна серединної поверхні по напрямку осі ОХ;

$k_{\acute{o}} = \dfrac{\partial^2 z}{\partial \acute{o}^2}$ - кривизна серединної поверхні по напрямку осі ОУ;

$k_{\eth\acute{o}} = \dfrac{\partial^2 z}{\partial \eth \partial \acute{o}}$ - кривизна кручення.

Можна вважати, що, по-перше, нормальний до серединної поверхні оболонки прямокутний елемент до деформації залишається прямолінійний і нормальним до деформованої серединної поверхні, по-друге, нормальна напруга, що діє на майданчиках, паралельних серединній поверхні оболонки, нехтує малі й у розрахунках їх можна не враховувати.

Таким чином, вважаємо, що гіпотези Кирхгоффа, які лежать в основі технічної теорії оболонок виконуються.

Напружено-деформований стан пологих оболонок в декартовій системі координат, як відомо, описується системою диференціальних рівнянь у вигляді:

статичне рівняння рівноваги

$$D\nabla^2\nabla^2 w - \nabla_k^2\varphi - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} - q = 0, \qquad (1)$$

геометричне рівняння спільності деформацій

$$\frac{1}{Eh}\nabla^2\nabla^2\varphi + \nabla_k^2 w + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y}\right)^2 = 0, \qquad (2)$$

де $D = \dfrac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ - циліндрична твердість оболонки;

E, μ – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки;

h – товщина оболонки;

$\nabla^2 = \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ - диференціальний оператор Лапласа;

$\nabla^2\nabla^2 = \dfrac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\dfrac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2} + \dfrac{\partial^4}{\partial y^4}$ - бігармонійний диференціальний оператор;

$\nabla_k^2 = k_y\cdot\dfrac{\partial^2}{\partial x^2} - 2k_{xy}\dfrac{\partial^2}{\partial x\partial y} + k_x\cdot\dfrac{\partial^2}{\partial y^2}$ - диференціальний оператор;

w - переміщення по напрямку осі Z;

φ – функція напруження;

q – інтенсивність розподілу навантаження.

Так як в нашому випадку коефіцієнт вспарушенности $\lambda = \frac{f}{h} > 6$, ($f$=$R$) то нелінійними членами в рівняннях (1), (2) можна нехтувати.

Оскільки, сферичні поверхні характеризується постійним радіусом кривизни на всіх напрямках, то кривизна виражається як, $k_x = k_ó = \frac{1}{R}$ кручення поверхні відсутнє, то $k_{õó} = 0$ і $k_x = k_ó = \frac{1}{R}$.

У результаті рівняння (1), (2) приймуть вигляд

$$D\nabla^2\nabla^2 w - \frac{1}{R}\nabla^2\varphi - q = 0;$$

$$\frac{1}{Eh}\nabla^2\nabla^2\varphi + \frac{1}{R}\nabla^2 w = 0.$$

Відносні деформації даної сферичної оболонки виражаються у вигляді:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{R}w;\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{R}w;\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y},$$

де ε_x, ε_y - відносні подовження по напряму осей ОХ і ОY;

γ_{xy} - відносний зсув;

u, v, w – переміщення точок серединної поверхні оболонки по напряму осей ОХ, ОY і ОZ.

Для випадку, коли тиск p усередині оболонки розподілений рівномірно, кільцева напруга визначається як

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{2h},$$

де p – внутрішній тиск.

Для визначення внутрішнього тиску, що виникає в оболонці ягоди у зв'язку із збільшенням об'єму за рахунок перетворення води в лід при заморожуванні, скористаємося виразом для визначення радіального переміщення

$$U_R = \frac{R\sigma}{E}(1-\mu).$$

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при заморожуванні розмір радіусу збільшується від R_1= 8,5 мм до R_2= 10,4 мм Таким чином $U_R = R_2 - R_1 = 1{,}9$. Звідки напругу знаходимо як

$$\sigma = \frac{EU_R}{R(1-\mu)} = \frac{0{,}1\cdot 1{,}9}{10(1-0{,}4)} = 0{,}048 \text{ Н/мм}^2.$$

Як відомо, граничний внутрішній тиск

$$ð_u = 2\sigma_â\frac{b-a}{b+a} = 2\sigma_â\frac{h}{R+h},$$

де $\sigma_{\hat{a}}$ - межа міцності при розтягуванні;

a – внутрішній радіус;

b – зовнішній радіус.

Для визначення $\sigma_{\hat{a}}$ брали шкірку (оболонку) винограду, вирізували з неї прямокутні шматочки (10х5) мм, які затискалися з двох сторін в спеціальному затиску (Рис.2). При чому затиск 2 був нерухомий, а затиск 3 рухомий.

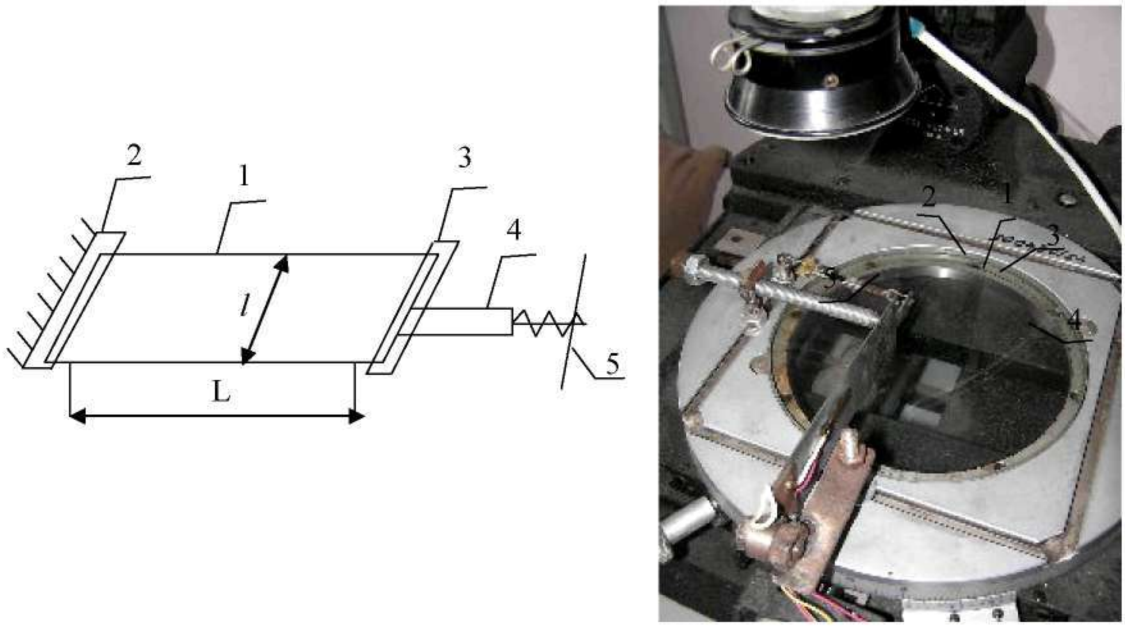

Рис. 2. Схема і фото установки для розтягування оболонки (шкірки) винограду: 1 – прямокутний шматочок шкірки винограду розміром Lxl; 2 – нерухомий затиск; 3 – рухомий затиск; 4 – тензометрична ланка; 5 – гвинт

За допомогою гвинта 5 створювали розтягування, яке через тензометричну ланку передавалося на зразок.

Установка кріпилася на столик мікроскопа марки БМ, за допомогою якого визначали зміну розмірів L і l для різних зусиль. При зусиллі 300 г оболонка розривалася. Потім визначали $\sigma_{\hat{a}}$.

Експериментальні дослідження показали, що $\sigma_{\hat{a}}$= 0,062 Н/мм^2. Таким чином, граничний внутрішній тиск p_u=0,00123 Н/мм^2.

Тоді, гранична напруга усередині ягоди $\sigma = \frac{\eth_u \cdot R}{2h} = 0{,}06\frac{Í}{ìì^{2}}$.

Висновок. Проведені дослідження показали, що усередині плоду мається внутрішній тиск, отже, заморожування і дефростацію плодів варто проводити при тиску рівному внутрішньому тискові в плодах.

Література
1. *Ялпачик В.Ф.* Исследование способов замораживания баклажан / В.Ф. Ялпачик // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології. – Одеса. – 2002. – С.122-132.
2. *Антонов А.А.* Совершенствование производства быстрозамороженных продуктов с использованием низкотемпературных просистем хладоснабжения: дис. доктора техн. наук:05.18.04 / А.А. Антонов –М., 2003.–350с.
3. *Флауменбаун Б.Л.* Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаун, С.С. Танчев, М.А. Гришин. – Агропроиздат, 1986.- 494с.
4. *Малинин Н.Н.* Прикладная теорія упругости и пластичності / Н.Н. Малинин.–М., 1975.– 339с.
5. *Самуль В.И.* Основы теории упругости и пластичности / В.И. Самуль. –М: Высшая школа, 1970.–288с.

МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ В ЯГОДЕ ВИНОГРАДА ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ

Малкина В.М., Ялпачик В.Ф.

Аннотация - данная работа посвящена разработке мероприятий направленных на улучшение товарного вида плодоовощной продукции при сохранении в замороженном состоянии. В статье представленны теоретические исследования, которые разрешают сделать вывод, что замораживания и дефростацию следует проводить при таких условиях, когда внутреннее давление равняется внешнему давлению.

PROCESS MODELING OF DEFORMATION IN VINE BERRY UNDER FREEZING

V. Malkina. V. Yalpachik

Summary

This work is devoted to development of measures aimed at improving salable condition of fruit and vegetable products kept frozen. This article describes theoretical researches which allow to draw the conclusion, that it is necessary to conduct freezing and defrosting under the conditions when the intrinsic pressure is equal to the external pressure.