УДК 001.891.54:634.21-027.33:539.3

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
ПЛОДУ КІСТОЧКОВИХ КУЛЬТУР ПРИ ЙОГО ОБРОБЦІ НА
ПЕРФОРОВАНИЙ ПОВЕРХНІ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ
MATHEMATICAL MODELING OF THE STRESSED STATE OF THE
FETUS STONE FRUITS WITH ITS PROCESSING ON PERFORATED
SURFACE IN THE FIELD OF CENTRIFUGAL FORCES**

**Кепін М.І., канд. техн. наук, доцент, Кирилов В.Х., д-р техн. наук, професор
Одеська національна академія харчових технологій
M. Kepin, V. Kyrylov
Odessa National Academy of Food Technologies**

Copyright © 2019 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1524>

Анотація. Розглянуто задачу математичного моделювання напруженого стану одиночного плоду кісточкової культури (абрикосу сорту "Домашній") в стадії технічної стиглості в момент його знаходження в зоні отвору круглої форми при транзитному переміщенні по перфорованій поверхні циліндричної оболонки в полі відцентрових сил. Рушійною силою процесу є обертальний рух лопатевого ротора.

Метою даного завдання є визначення мінімального значення кутової швидкості лопатевого ротора, що забезпечує руйнування покривної тканини і м'якоті плоду для їх відділення від кісточки.

Мірою для визначення кутової швидкості є максимальне значення міцності покривної тканини на прокол за допомогою пенетрометра з циліндричним наконечником (індентором) площею поперечного перерізу 1 мм².

Практичне використання результатів дослідження дозволить застосувати оптимальні режими переробки кісточкової сировини рослинного походження у вихідному (біологічному) стані з метою відокремлення м'якоті від кісточок в умовах відцентрового поля в залежності від міцності покривних тканин.

Abstract. The problem of mathematical modeling of the stress state of a single stone fruitcrop (apricot «Domashny») on the technical maturity stage at the time of its presence in the zone of a circular hole during transit movement along the perforated surface of a cylindrical shell in a centrifugal force field is considered. The driving force of the process is the rotational motion of the bladed rotor.

The aim of this task is to determine the minimum angular velocity of the bladed rotor, which ensures the destruction of the outer peel and fruit pulp for their separation from the stone. A measure for determining the angular velocity is the maximum value of the strength of the outer peel for puncture using a penetrometer with a cylindrical tip (indenter) with a cross-sectional area of 1 mm².

Nowadays, the removal of stones from the fruit is carried out mainly with the help of stone-punching machines of cyclic action. The efficiency of these machines depends on the biological connection of the storage tissue (pulp) with the stone. The best option is the lack of connection (some varieties of plums, sweet cherries), or the minimum connection, as usual, in the area of the fruit stalk (some varieties of apricot). The disadvantage of these machines is the need for their readjustment when changing the type of stone fruits, which leads to additional material costs.

Fruit processing in a centrifugal field using a fixed perforated shell and a rotating bladed rotor allows the processing of stone fruits to be carried out in a continuous mode regardless of the connection between the fruit pulp and the stone.

Practical application of the research results will allow us to develop optimal modes for processing stone fruits in a biological state, taking into account the strength characteristics of fruit outer peel.

Ключові слова: плід, міцність тканин, переробка, , перфорована оболонка, відцентрове поле.

Keywords: fetus, tissue strength, processing, perforated shell, centrifugal field.

Вступ. Основою для виготовлення харчових продуктів є сировина тваринного, рослинного і мінерального походження. Для отримання готового продукту сировину піддають певного впливу, метою якого є зміна його властивостей або стану. При цьому можуть вирішуватися різні задачі: поліпшення органолептичних властивостей, зміна структурно-механічних властивостей, відділення неїстівних частин на початкових стадіях переробки, зміни, пов'язані з необхідністю економії енергоносіїв, спрощення схем переробки та ін.

Ступінь впливу на вихідну сировину залежить від його виду, підвидів в кожному виді, кліматичних умов вирощування, вимог до готового продукту та інших чинників.

Кожен конкретний вид сировини є єдиним цілим, що складається з частин, які, в основному, істотно відрізняються один від одного властивостями: фізико-механічними, фізико-хімічними, біологічними, теплофізичними і іншими показниками. При цьому сировина характеризується наявністю цінних в харчовому відношенні частин, малоцінних і неїстівних. До останніх відносять шерсть, кістки, сполучні тканини, луска, плавники тощо (м'ясо і рибопродукти), насіння, насінневі коробки, кісточки, плодоніжки, чашолистки, суцвіття, баластні тканини і інші складові (сировина рослинного походження).

Стосовно плодів кісточкових культур основною неїстівною складовою є кісточка, другорядною – плодоніжка (деякі сорти вишень і черешень).

Таким чином, основним завданням на початковій стадії переробки кісточкової сировини є необхідність поділу плодів на напівфабрикат (м'якоть) і відходи (кісточка). М'якоть використовують для виготовлення соків прояснених і соків з м'якоттю, фруктових соусів, приправ і ін. Кісточка у вихідному (біологічному) стані є цінною вторинною сировиною, з якої виготовляють як харчову продукцію, так і продукцію, яка використовується в косметологічній, фармацевтичній, технічній та інших галузях.

Аналіз проблеми. На переробних підприємствах поділ кісточкових плодів на складові (м'якоть і кісточка) реалізують за трьома принципово різними напрямками: видалення кісточок безпосередньо з плодів у свіжому стані (прямий спосіб), з попередньою тепловою обробкою (проміжний спосіб) і комбінований спосіб.

Видалення кісточок прямим способом після операцій інспекції, миття та калібрування здійснюють вибиванням, видавлюванням, розрізанням, вирізанням.

При проміжному способі поділ на фракції здійснюється в умовах відцентрових сил інерції за допомогою протиральних машин після інспекції, миття та теплової обробки (бланшування або розварювання) [1].

Комбінований спосіб крім операцій, що застосовуються при використанні проміжного способу, включає операцію попереднього руйнування плодів без порушення цілісності кісточок (наприклад, за допомогою валкових дробарок). Після цього отриману суміш підігрівують і протирають [2].

Видалення кісточок способами розрізання та вирізання застосовують у випадках, коли готова продукція являє собою фрагменти цілого, наприклад, курага або оливки без кісточок.

Обов'язковою умовою при вибиванні, видавлюванні або розрізанні є відсутність біологічного зв'язку м'якоті з кісточкою (кісточка "вільна") або має місце локальний зв'язок, як правило, на ділянці плодоніжки або по ребру кісточка (наприклад, абрикоси).

Видалення кісточок способами вибивання і видавлювання застосовують для отримання як однорідної продукції, наприклад, освітлені соки, так і неоднорідної, наприклад, соуси, приправи і інше. Також, можна отримати продукцію у вигляді окремих фрагментів, наприклад, компоти без кісточок. В цьому випадку ефективність роботи обладнання істотно залежить від біологічного зв'язку м'якоті з кісточкою. При наявності на кісточках залишкової м'якоті останні піддають тепловій обробці з подальшим протиранням.

Таким чином, з перерахованих вище способів переробки плодів кісточкових культур з метою розділення на фракції (м'якоть і кісточка) для порівняння зі способом, запропонованим в роботі [3] (відділення м'якоті від кісточок крайками отворів круглої форми при транзитному русі плодів по внутрішній поверхні нерухомої перфорованої оболонки під дією обертового руху лопатевого ротора), можуть бути розглянуті способи видалення кісточок вибиванням, видавлюванням і проміжний спосіб з використанням протиральних машин.

Огляд літератури. На переробних підприємствах видалення кісточок з плодів способом вибивання реалізується за допомогою кісточковивбивних машин. Відомі лінійні і барабанні машини [4], які за принципом роботи аналогічні, відрізняються конструктивним виконанням. Зазначені машини відносяться до групи переривчасто-поточного обладнання, в яких видалення кісточок відбувається в момент зупинки транспортера або барабана. Машини укомплектовані додатковими стрічками або барабанами для переробки плодів з різними геометричними характеристиками.

Спосіб видавлювання реалізується за допомогою барабанних машин безперервної дії, які призначені для переробки плодів, в яких кісточки легко відокремлюються від м'якоті: абрикоси, вишні, персики (нектарини) і деякі сорти слив.

Механізм видалення кісточок складається з двох барабанів, зовнішня поверхня одного з яких покрита гумовою оболонкою, інший оснащений зубчастими плитами. Завдяки зустрічному обертанню барабанів плоди потрапляють в робочий простір, де за допомогою зубців кісточка видаляється з плоду і вдавлюється в гумову оболонку, а м'якоть залишається між зубцями. При подальшому русі барабанів спеціальними ножами м'якоть і кісточка відокремлюються від барабанів і під дією сил тяжіння в різних напрямках вивантажуються з машини.

Традиційна технологічна схема підготовчого етапу переробки кісточкової сировини з використанням проміжного способу, як було показано, включає операції інспекції, миття, термічної обробки і протирання. Основною метою теплової обробки кісточкових плодів є руйнування біологічних зв'язків між клітинами покривних і паренхімних тканин, а також між паренхімними тканинами і кісточками. Таке руйнування обумовлено зміною в клітинних стінках вуглеводів, в основному протопектину [5].

При нагріванні цілих плодів термін обробки залежить від їх виду і сорту в кожному виді і коливається в доволі широкому діапазоні (5...25) хв. при температурі від 95 °С до 110 °С [6]. Зазначений підхід негативно впливає на збереження біоенергетичного потенціалу в готовій продукції. Крім цього ускладнюються технологічна лінія переробки сировини через наявність теплового обладнання, збільшуються матеріальні ресурси для його експлуатації та обслуговування.

В роботі [7] методом кінетостатики визначена реакція ріжучої крайки отвору, яка залежить від діаметра отворів, діаметра плодів, їх маси, відцентрової сили і радіуса перфорованої оболонки. Крім зазначених факторів на продуктивність процесу за кількістю відокремлюваної м'якоті від кісточок впливає міцність покривних тканин плодів.

Для визначення міцності тканин плодоовочевої продукції використовують інструментальні методи, де під поняттям "визначення міцності" розуміють як опір пластичному проникненню більш твердого тіла в досліджуваний матеріал [8]. При цьому найбільш широко використовують пенетрометри з різними за формою і розмірами інденторами (насадками).

Для визначення міцності тканин на прокол користуються відомим пенетрометром Магнесс-Тейлора і різних його модифікацій (ручний, механічний) з різними конструкціями насадок [9].

В роботі [10] визначали міцність і твердість на прокол зразків гарбуза з шкіркою і без неї (м'якоті) за допомогою пенетрометра з використанням сферичного індентора діаметром 8 мм з метою визначення максимального статичного навантаження, при якому відбувається деформація плодів при їх зберіганні.

Дослідження питання механічної міцності динь при їх транспортуванні з поля до місця збереження, а також дію статичних навантажень при зберіганні освітлено в роботі [11]. Показано, що ослаблення здатності плодів протистояти деформуючим навантаженням пояснюється їх дозріванням, при якому клітини стають більші за розміром, не так щільно контактують між собою, між ними з'являються проміжки, що призводить до зміни консистенції м'якоті плодів.

Щодо плодів кісточкових культур в літературних джерелах і інтернет-ресурсах не знайдено інформації щодо дослідження питання про вплив міцності тканин плодів при видаленні кісточок способами вибивання, витискування або вирізання. Винятком є інформація на рівні експертної оцінки щодо покривних тканин і тканин м'якоті. Покривні тканини характеризуються як "щільна", "міцна", "дуже міцна", "тонка", "товста"; тканини м'якоті - "щільна", "соковита", "дуже соковита", "волокниста", "грубувато-волокниста", "хрящувата", "ніжна".

Зазначені характеристики не можуть служити оцінкою стану складових плодів з точки зору механічних характеристик, але це вказує на неоднорідність об'єктів рослинного походження, необхідність їх дослідження і використання отриманих показників при визначенні оптимальних режимів для їх переробки. Останнє твердження визначило мету цієї роботи. При цьому прийняті наступні допущення: аналітичні дослідження виконували з одиничним плодом для виключення впливу сусідніх плодів при їх переміщенні в зазначених умовах; форма плоду - кругла.

Метою роботи є визначення мінімального значення кутової швидкості лопатевого ротора, що забезпечує руйнування покривної тканини і м'якоті плоду в стадії технічної зрілості для їх відділення від кісточка. Мірою визначення кутової швидкості є максимальне значення міцності покривної тканини на прокол за допомогою пенетрометра з циліндричним наконечником (індентором) площею поперечного перерізу 1 мм².

Основна частина. Матеріали і методи досліджень. У дослідженні для визначення міцності покривної тканини (шкірки) цілого плоду у вихідному стані (разом із м'якоттю) і міцності м'якоті без шкірки, яку попередньо вручну вирізали, використовували пенетрометр з циліндричним наконечником з плоскою робочою поверхнею площею 1 мм². В якості об'єктів дослідження використовували плоди кісточкових

культур наступних видів: абрикос "Домашній", алича "Дрібноплідна", вишні "Шпанка рання", кизил "Володимирівський", слива "Угорка італійська".

Для визначення міцності шкірки з м'якоттю по кожному виду плодів формували партії по 10 плодів візуально однакових розмірів, без механічних пошкоджень. Міцність визначали по десяти характерних точках. Наприклад, при визначенні міцності абрикос сорту "Домашній" враховували їх орієнтацію в просторі "північ-південь", при визначенні міцності слив сорту "Угорка італійська" вимірювання виконували в екваторіальному і меридіональному напрямках та на локальній ділянці плодоніжки. Після цього на нових ділянках плодів видаляли покривні тканини і за новими десятима точками визначали міцність м'якоти. Результати досліджень представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Міцність покривних тканин плодів і м'якоті на прокол

Плоди	Міцність покривних тканин плодів і м'якоті на прокол, σ , гс/мм ²				
	Мінімальні і максимальні значення міцності покривних тканин плодів		Середні значення міцності покривних тканин плодів, σ_T^{cp}	Середні значення міцності м'якоті, σ_M^{cp}	Відношення $\frac{\sigma_T^{cp}}{\sigma_M^{cp}}$
	σ_T^{min}	σ_T^{max}			
Абрикос «Домашній»	14	36	22,5	8	2,8
Алича «Дрібноплідна»	30	73	48,5	6	8,1
Вишні «Шпанка рання»	14	27	19,7	7	2,8
Кизил «Володимирівський»	20	46	30,9	20	1,5
Слива «Угорка італійська»	40	75	49,5	12	4,1

Теоретична частина. В умовах транзитного руху в полі відцентрових сил в результаті контакту робочої крайки отвору з плодом деформація тканин носить доволі складний характер: тут мають місце одночасне стиснення тканин плоду, їх розтягування і зміщення (зсув) шарів відносно один одного.

Відповідно до мети завдання необхідно на рівні математичного моделювання напруженого стану плоду визначити мінімальне навантаження, при якому відбувається руйнування його тканин.

Механічний ефект руйнування плоду кісточкових культур на перфорованій поверхні в умовах відцентрового поля пояснюється тим, що під дією відцентрових сил плід притискається до отвору з частковим його заглибленням (рис. 1) [7]. При цьому на плід діє робоча (атакуюча) крайка отвору, довжина якої не перевищує значення $l \leq \pi r_o$, де r_o - радіус отвору.

Крайка A перфорованого отвору, при обертанні лопаті, надає «ріжучу» дію на поверхню плоду (сила $\bar{N}_A$). Реакція $\bar{N}_A$ ріжучої крайки в малій околиці контактного впливу на поверхню плоду представляється

зосередженої силою (точка A), що має напрямок по нормалі до поверхні плоду. Процес руйнування цілісності поверхні плоду має місце при виникненні гранично допустимих нормальних і дотичних напружень в зоні контактного впливу сили. Таким чином, математичний опис процесу механічної обробки плоду кісточкових культур зводиться до розрахунку пружного стану напівплощини тіла плоду при наявності нормальної зосередженої сили. Математична модель розглянутого процесу зводиться до вирішення рівнянь теорії пружності визначення плоского напружено-деформованого стану півплощини матеріалу плоду під дією нормальної зосередженої сили. Це завдання в теорії пружності відома як задача Фламана, яка широко застосовується в будівельній механіці для розрахунку фундаментів.

1 – покривна тканина (шкірка); 2 – м'якоть; 3 – кісточка;
4 – перфорована поверхня; 5 – лопать

Рис. 1 - Схема дії відцентрової сили на плід в процесі відділення м'якоті від кісточки в зоні отвору

Плоский напружено-деформований стан напівплощини описується наступною системою рівнянь, що складається з двох рівнянь рівноваги (1а, б) і рівняння безперервності (2) [12, 13].

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (1б)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0 \quad (2)$$

де $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ – нормальні напруження і $\sigma_{xy}(x, y)$ – дотичне напруження матеріалу плоду в точці (x, y) напівплощини (рис. 2).

Ця система рівнянь (1а, б) і (2) повинна бути вирішена при граничній умові за $y = 0$ і на нескінченному віддаленні від контактної області точки A при $y \rightarrow +\infty$ і при $x \rightarrow \pm\infty$.

Нехай на початку координат на кордоні $y = 0$ на пружну напівплощину $y \geq 0$ діє в напрямку вісі Oy зосереджена сила $\bar{N}$ (рис.2).

Тоді вздовж кордону $y = 0$ нормальна напруга σ_y має розподіл, що містить функцію Дірака.

$$-\sigma_y = n(x) = N\delta(x) \quad (3)$$

де $\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ \infty, & x = 0 \end{cases}$ – функція Дірака,

а $\sigma_x = \sigma_{xy} = 0$.

На нескінченно віддаленій області від початку координат пружні напруги повинні бути відсутніми:

$$\text{при } y \rightarrow \infty \quad (|\sigma_x|, |\sigma_{xy}|, |\sigma_y|) \xrightarrow{y \rightarrow \infty} 0, \quad (4)$$

$$\text{при } x \rightarrow \pm\infty \quad (|\sigma_x|, |\sigma_{xy}|, |\sigma_y|) \xrightarrow{x \rightarrow \pm\infty} 0. \quad (5)$$

Рішення диференціальної задачі (1 - 5) проводиться за допомогою інтегрального перетворення Фур'є:

$$\left. \begin{aligned} f^*(k) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx} f(x) dx \\ f(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikx} f^*(k) dk \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Формули (6) дають можливість отримати зображення $f^*(k)$ по заданому оригіналу $f(x)$ і, навпаки, оригінал $f(x)$ по відомому зображенню.

В результаті звичайної процедури прямого і зворотного перетворення (6) отримаємо рішення задачі Фламана:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= -\frac{2N}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_{xy}(x, y) &= -\frac{2N}{\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_y(x, y) &= -\frac{2N}{\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

На рис. 3 наведені залежності (7) напруг $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_{xy}(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ і відповідні їм лінії рівня (розрахунок проведено в середовищі комп'ютерної математики MatLab).

Рис. 3 - Графіки напруг згідно рівнянь

З (7) випливає, що в точці прикладання зосередженої сили (при $x, y = 0$) всі напруги $\sigma_x, \sigma_{xy}, \sigma_y$ нескінченно великі. Зазначений результат слід розуміти в тому сенсі, що рішення (7) на початку координат взагалі не придатні. Щоб отримати справжню картину напружень і переміщень в околиці цієї точки, треба виходити з істинного закону розподілу нормального поверхневого навантаження поблизу $x = 0$ (рис. 4). Формули (7) справедливі лише при $x \gg a$ (де a - відрізок по осі Ox , який містить точку $x = 0$, на якому нормальне навантаження відмінне від нуля).

Рис. 4 - Лінії рівних напружень [14]: а - для σ_v (ізобари)

Розглянемо застосування наведеного теоретичного матеріалу на практиці обробки кісточкових культур на перфорованій поверхні в полі відцентрових сил.

В околиці вістря A крайки отвору (рис. 1) при досягненні граничних напруг утворюється зона пластичності, яка приводить до руйнування шкірки (оболонки поверхні матеріалу плоду).

Однак, ці граничні напруги для шкірки призводять також до пластичності м'якоті плоду завдяки наявності великого вмісту води в рослинних клітинах.

Таким чином, механічний ефект обробки плодів кісточкових культур (з метою відділення шкірки і м'якоті плоду від кісточок) зводиться до досягнення на «ріжучій» крайці отвору таких значень нормальних напружень (межа міцності), які приводили б до руйнування насамперед шкірки, а подальше відділення м'якоті від кісточок відбуватиметься з меншими значеннями ріжучих напружень.

В роботі [7] отримано наступне значення реакції ріжучої кромки перфорованого отвору (нормальна зосереджена сила):

$$N_A = \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \cdot \frac{F_u}{\cos \alpha \operatorname{ctg} \beta - \sin \alpha} \quad (8)$$

де $F_u = m\omega^2 R_1$ відцентрова сила, Н;

m - маса плоду, кг;

ω - кутова швидкість лопатей, с^{-1} ;

R_1 - відстань центру мас плоду до вісі обертання лопатей, м;

Кути α і β зображені на рис. 1.

Тоді:

$$N_A = \frac{m\omega^2 R_1}{\sin \beta (tg \beta - tg \alpha)}, \text{ Н} \quad (9)$$

Припускаємо, що дана сила рівномірно розподілена по площі, $S = 1 \text{ мм}^2$, поверхні шкірки плоду. В результаті нормальна напруга в околиці ріжучої крайки отвору дорівнює

$$N = \frac{N_A}{S} = 102 \frac{m\omega^2 R_1}{\sin \beta (tg \beta - tg \alpha)}, \frac{\text{гс}}{\text{мм}^2} \quad (10)$$

Проведемо спрощення даної розрахункової формули, враховуючи, що відношення $\frac{r_n}{R} \ll 1$, $\frac{r_0}{R} \ll 1$ – малі величини (r_n - радіус плоду, м; r_0 - радіус отвору, м; R - внутрішній радіус перфорованої поверхні, м. Маємо:

$$R_1 = R - \sqrt{r_n^2 - r_0^2} = R \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_n}{R}\right)^2 - \left(\frac{r_0}{R}\right)^2} \right) \approx R, \sin \alpha = \frac{r_n}{R - \sqrt{r_n^2 - r_0^2}} \approx \frac{r_n}{R} \quad \text{і} \quad \cos \alpha \approx 1.$$

Тоді, враховуючи, що $\sin \beta = \frac{r_0}{r_n}$, знаходимо:

$$N = 102 \frac{m\omega^2 R}{r_0^2} \frac{r_n \sqrt{r_n^2 - r_0^2}}{r_0^2}, \frac{\text{гс}}{\text{мм}^2} \quad (11)$$

або, вводячи позначення $r = \frac{r_n}{r_0}$ (відношення радіуса плоду до радіуса отвору), отримаємо:

$$N = 102 m \omega^2 R r \sqrt{r^2 - 1}, \frac{\text{гс}}{\text{мм}^2} \quad (12)$$

За відомим максимальним значення ріжучої сили N_{κ}^{max} на прокол поверхні шкірки плоду з (12) одержимо:

$$9810 \sigma^{max 6^2 \sqrt{r^2 - 1}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \quad (13)$$

де σ^{max} – максимальна міцність шкірки плоду, гс/мм^2 , (табл. 1).

На підставі даного співвідношення для кожного відповідного виду кісточкових культур за формулою (13) можна визначити залежність кутової швидкості ω обертання лопатей ротора від радіуса отвору.

Таким чином, шукана мінімальна кутова швидкість ротора, що забезпечує «ріжучий» ефект, визначається за формулою:

$$\omega \sqrt{\frac{9810\sigma^{max}}{10^6 M_n R r \sqrt{r^2 - 1}}}_{min}, \text{ c}^{-1} \quad (14)$$

де M_n – маса плоду, кг.

Результати досліджень. Для абрикос сорту «Домашній» за даними (табл. 1) $\sigma^{max}=36$ гс/мм² і значенням $M_n=0,015$ кг, $R=0,062$ м при ($r_n=15$ мм, $r_o=1, 2, 3, 4, 5$ мм) регресійний аналіз в середовищі Excel [15], проведений за даними (14), представлений наступною регресійною кривою (рис. 5):

$$\omega_{min} = 43,199 r_o^{-0,47} \quad (15)$$

Обговорення. Необхідність визначення міцності тканин плодів в двох станах (окремо цілого плоду і окремо м'якоті) пояснюється реальною картиною поведінки плоду в умовах відцентрового поля. Напруження, що виникають в момент знаходження

Рис. 5 – Графік залежності кутової швидкості лопатей від радіуса отворів для забезпечення руйнування тканин плоду

відділення від кісточки.

2. З огляду на широкий діапазон міцності покривних тканин плодів в залежності від їх виду, сорту в кожному виді, кліматичних і суб'єктивних умов вирощування, отримане рівняння дозволить раціонально визначати необхідні режими переробки.

Література

- Аминов, М.С., Дикис, М.Я., Мальский, А.Н. Технологическое оборудование консервных заводов. Москва: Агропроиздат. 1985. 319 с.
- Самсонова, А.Н., Ушева, В.Б. Фруктовые и овощные соки. Москва: Агропроиздат. 1990. 287 с.
- Кепін, М. І. Моделювання процесу переробки плодів кісточкових культур у свіжому стані на перфорованій поверхні в полі відцентрованих сил. Харчова наука і технологія. 2016. (10, № 2). С. 66 - 72.
- Ситников, Е. Д., Качанов, В. А. Оборудование консервных заводов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 248 с.
- Дубініна, А. А., Хацкевич, Ю. М., Попова, Т. М. Загальна технологія харчових виробництв. Навчальний посібник [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elib.hduht.edu.ua.82.pdf>
- Гладушняк, А.К. Теория и практика протирания и финиширования растительного сырья: дис. – Одесса: дис. д-ра техн. наук. 1985. 346 с.
- Кепін, М.І., Кирилов, В.Х. Теоретичне обґрунтування процесу переробки плодів кісточкових культур. Харчова наука і технологія. 2016. № 10, № 3. С. 82 - 86.

8. ДСТУ 2825-94 «Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять» – № 260 від 31.10.1994, К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 42 с.
9. Abbott1 Judith A., Roger Harker F.: URL: www.ba.ars.usda.gov/hb66/021texture.pdf (дата звернення: 10.11.2013).
10. Shirmohammadi, M., Yarlagadda, P. K. Experimental study on mechanical properties of pumpkin tissue. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Т. 54. № 1. 2012. Р. 16 - 24.
11. Иванченко, В.И., Степаненко, Д.С., Грибова, Д.В. Влияние способа обработки и упаковки на механическую прочность плодов дыни при хранении. *Магарац. Виноградарство и виноделие*. № 1. 2013. С. 19 - 21.
12. Новожилов, В. В., Теория упругости. Litres. 2017. 409 с.
13. Dintwa E. et al. A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells // *Journal of Food Engineering*. 2011. Т. 103. №. 3. С. 265 - 272. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.023>
14. Алексеев С.И., Алексеев П.С. Механика грунтов. Основания и фундаменты. СПб: Строительство. 2014. 332 с.
15. Левин, Д. М. Стефан Дэвид, Кребиль, Тимоти С, Беренсон Марк Л. Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel, 4-е изд. Пер. с англ. *Издательский дом «Вильямс»*. 2004. 1312 с.

References

1. Aminov, M.S., Dikis, M.Ya., Mal'skiy, A.N., & Hladushnyak, A.K. (1985). Tekhnologicheskoe oborudovanie konservnykh zavodov. *Ahromproizdat*, 319.
2. Samsonova, A.N., Usheva, V. B. (1990). Fruktovyie i ovoschnyye soki. *Agromproizdat*, 287.
3. Kepin, M. I. (2016). Modelyuvannya protsesu pererobki plodiv kistochkovih kultur u svizhomu stani na perforovaniy poverhni v poli vidtsentrovanih sil. *Harchova nauka i tehnologiya*, (10, № 2), 66 - 72.
4. Sitnikov, E. D., Kachanov, V. A. (1984). Oborudovanie konservnykh zavodov. *Legkaya i pischevaya promyshlennost*, 248.
5. Dubinina, A. A., Hatskevich, Yu. M., Popova, T. M. Zagalna tehnologiya harchovih virobntstv. Navchalniy posibnik [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://elib.hduht.edu.ua.82.pdf>
6. Gladushnyak, A. K. Teoriya i praktika protiraniya i finishirovaniya rastitelnogo syirya: dis. – Odessa: *dis. d-ra tehn. nauk*, 1985, 346.
7. Кепін, М. І., & Кирилов, В. Х. (2016). Теоретичне обґрунтування процесу переробки плодів кісточкових культур. *Харчова наука і технологія*, (10, № 3), 82 - 86.
8. DSTU 2825-94 «Rozrakhunky ta vyprobuvannya na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat» – № 260 vid 31.10.1994, K.: *Derzhspozhyvstandart Ukrainy*, 1996, 42.
9. Abbott1 Judith A., Roger Harker F.: URL: www.ba.ars.usda.gov/hb66/021texture.pdf (data obrashcheniya: 10.11.2013).
10. Shirmohammadi, M., & Yarlagadda, P. K. (2012). Experimental study on mechanical properties of pumpkin tissue. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 54(1), 16 - 24.
11. Ivanchenko, V. I., Stepanenko, D. S., & Gribova, D. V. (2013). Vliyanie sposoba obrabotki i upakovki na mehanicheskuyu prochnost plodov dyini pri hranenii. *Magarach. Vinogradarstvo i vinodelie*, (1), 19 - 21.
12. Novozhilov, V. V. (2017). *Teoriya uprugosti*. Litres. 409.
13. Dintwa, E., Jancsó, P., Mebatsion, H. K., Verlinden, B., Verboven, P., Wang, C. X., ... & Nicolai, B. (2011). A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 265 - 272. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.023>
14. Alekseev, S. I., Alekseev, P.S. (2014). Mehanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty. *SPb: Stroitelstvo*, 332.
15. Levin, D. M. (2004). Stefan Devid, Krebil, Timoti S, Berenson Mark L. Statistika dlya menedzherov s ispolzovaniem Microsoft Excel, 4-e izd. Per. s angl. *Izdatelskiy dom «Vilyams»*, 1312.

Cite as

Кепін М.І., Кирилов В.Х. Математичне моделювання напруженого стану плоду кісточкових культур при його обробці на перфорованій поверхні в полі відцентрових сил // *Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій*. Одеса, 2019. Т. 83, вип. 2. С. 112 – 120.

Отримано в редакцію 08.07.2019
Прийнято до друку 09.09.2019

Received 08.07.2019
Approved 09.09.2019