

**Міністерство аграрної політики та  
продовольства України  
Міністерство освіти і науки України  
Національний університет харчових технологій**

**«Ресурсо- та енергоощадні технології  
виробництва і пакування харчової  
продукції – основні засади її  
конкурентоздатності»**

**Матеріали IV Міжнародної спеціалізованої  
науково-практичної конференції**

**8 вересня 2015 р.  
м. Київ, Україна**

**Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності:** Матеріали IV Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції. 8 вересня 2015 р., м. Київ. – К. НУХТ, 2015. – 198 с.

У матеріалах конференції наведено доповіді за такими напрямками: стан та шляхи ресурсо- й енергозаощадження на підприємствах харчової промисловості; інноваційні та ресурсощадні технології продуктів харчування; використання нетрадиційної сировини в технологіях продуктів харчування; інноваційні технології пакування харчових продуктів; енергоощадні та ресурсозберігаючі технології виготовлення тари та упаковки; інноваційні складові створення пакувального обладнання; енергоменеджмент на підприємствах харчової промисловості; шляхи підвищення ефективності виробничої логістики на підприємствах харчової промисловості.

На основі науково- дослідних робіт запропоновано шляхи вирішення прикладних задач нагальної проблеми в харчовій промисловості – ресурсо- та енергозаощадження.

Матеріали конференції будуть корисні науковим та інженерно-технічним працівникам, виробничникам, потенційним інвесторам, студентам ВНЗ та всім, хто пов'язаний з харчовою та пакувальною індустрією.

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕМБРАН ВАКУУМНИХ КРИШОК

**Вступ.** Світовий ринок харчових продуктів висуває досить жорсткі вимоги до захисних властивостей упаковки, особливо для продуктів тривалого зберігання та дитячого харчування, часто пакованих у скляну тару.

Поширеним засобом фіксації початкового відкриття упаковки та герметичності системи закупорювання скляної тари є спеціальний рельєф центральної частини поля металевих кришок відомий як “контрольна кнопка”. Цей рельєф являє собою пружну мембрану, розташовану в центрі поля кришки. Мембрана виконує функцію індикатора, який в залежності від її стану – втягнутого або опуклого – свідчить про наявність або відсутність в упаковці вакууму а отже про її герметичність та сигналізує про її початкове відкриття.

**Актуальність.** Більшість кришок з мембранами на ринок України постачається закордонними виробниками, які мають значний досвід їх виробництва. Налагодження виробництва кришок з мембранами вітчизняними виробниками стикається з проблемами обумовленими ускладненням штапового оснащення, необґрунтованістю конструкції мембран та застосування жерсті з різними властивостями, а також незначним досвідом їх виробництва або його відсутністю. Загалом цей напрямок досліджень пов'язаний з удосконаленням технологій пакування, що забезпечують тривалий термін зберігання високої біологічної цінності продуктів харчування.

**Основна частина.** Мембрани функціонують за принципом контрольованої втрати стійкості, рис. 1. Вони втрачають стійкість від виникнення в тарі вакууму певної глибини, який спричиняє перепад тиску на поле кришки, та відновлюють початкову форму коли перепад тиску зникає. Надалі цей перепад тиску називатимемо тиском.

Закупорювання здійснюється паро-вакуумним способом, в результаті чого в упаковці створюється початковий вакуум. В процесі теплової обробки продукції на поле кришок діють зусилля. Тут можливі два випадки: перший, коли тиск в системі перевищує тиск всередині упаковки, та другий, коли внутрішній тиск в упаковці перевищує тиск в системі.

Теплова обробка продукції може суттєво впливати на роботу мембран. Для запобігання відкриттю затвора на етапах теплової обробки продукції (нагрівання та витримка), у більшості випадків необхідне відповідне регулювання протитиску системи. Можливі два випадки:

- протитиск в системі значно перевищує внутрішній тиск в упаковці, тоді під час стерилізації може відбутися прорізання ущільнювальної прокладки або порушення функціонування мембрани кришки і навіть пластична деформація поля кришки;
- внутрішній тиск в упаковці значно перевищує протитиск в системі, тоді під час стерилізації може відбутися зміна посадки кришки шляхом обертання в бік відкриття аж до розгерметизації затвора, що є неприпустимим.

В цілому в процесі теплової обробки продукції для кришок більш сприятливим є стале перевищення протитиску.

Крім того, упродовж всього терміну зберігання готової продукції внаслідок паро-вакуумного способу закупорювання в упаковці виникає кінцевий вакуум.

Очевидно, що із зазначених випадків силової дії на поле кришки величина перепаду тиску на поле може досягти максимальної величини під час теплової обробки продукції.

Значення критичних тисків втрати стійкості та відновлення початкової форми, які визначають робочий інтервал функціонування існуючих мембран, загалом відомі і надаються фірмами-виробниками кришок.

Конструктивно мембрана складається з чутливої до перепаду тиску частини зовнішнім діаметром  $D_2$  (рис. 1), яку називають робочий конус, та з жорсткої конічної частини діаметром  $D_3$ , яку називають опорний конус. Жорсткість цих частин визначається кутом нахилу твірної конусів.

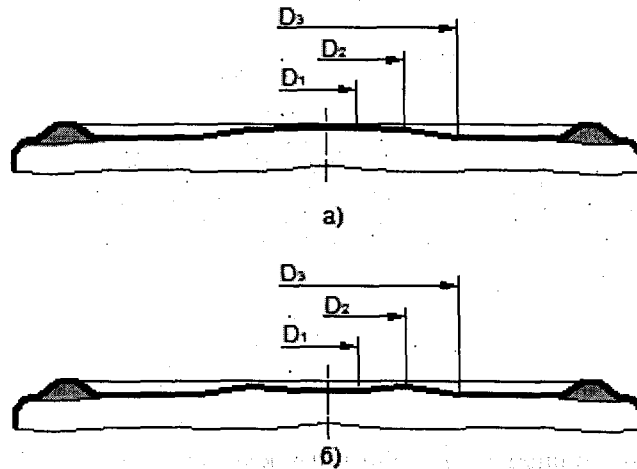


Рисунок 1 – Поле кришки системи ТО (твіст-офф):

- а) мембрана в ненавантаженому стані;  
б) мембрана у стані втрати стійкості

Дотримуватимемо розрахункової схеми в якій робочий конус зацемлений по контуру, з вільним радіальним зміщенням точок контуру (рис. 2).

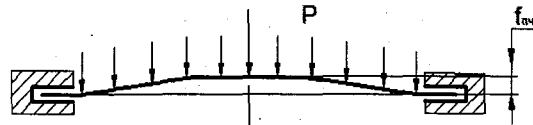


Рисунок 2 – Схема закріплення мембрани

Розрахункова математична модель для аналізу роботи мембран, отримана на основі математичного апарату теорії пластин та оболонок з використанням методів інтегрування [3], має вигляд

$$\frac{8}{3}Df - \frac{PR^4}{24} + \frac{1}{28}E\delta(f^3 - 3f^2f_{nч} + 2f_{nч}^2f) = 0; \quad (1)$$

де  $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$  – циліндрична жорсткість мембрани;  $f_{nч}, f$  – початковий та додатковий

прогини центра мембрани;  $P$  – тиск (навантаження) на мембрану;  $R$  – радіус контуру мембрани ( $D_2/2$ , рис. 1);  $E$  – модуль нормальної пружності матеріалу мембрани;  $\delta$  – товщина мембрани (жерсті);  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу мембрани.

Представимо рівняння (1) в безрозмірному вигляді і для полегшення програмування шляхом перетворень подамо його в загальній формі кубічного рівняння

$$\zeta^3 - 3\zeta_{nч}\zeta^2 + 2\left(\zeta_{nч}^2 + \frac{28}{9} \frac{1}{1-\mu^2}\right)\zeta - \frac{7}{6}P^* = 0; \quad (2)$$

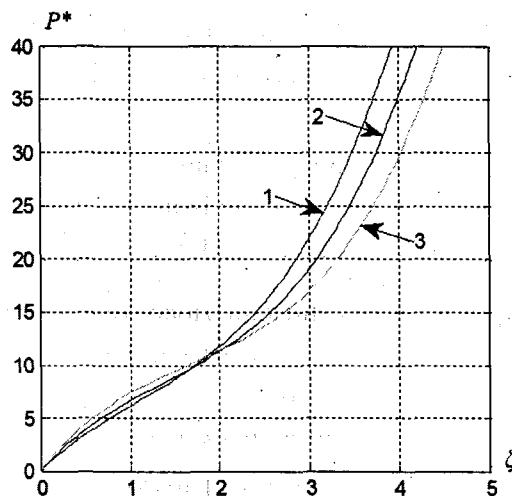
де  $\zeta_{nч} = \frac{f_{nч}}{\delta}$  та  $\zeta = \frac{f}{\delta}$  – початковий та додатковий безрозмірні прогини центра мембрани;

$P^* = \frac{PR^4}{E\delta^4}$  – безрозмірний тиск на мембрану.

Комп'ютерне моделювання виконувалося за допомогою програмного забезпечення MATLAB R2008a. було розроблено комп'ютерну програму для розрахунку  $\zeta$  та  $P^*$  і подальшого представлення залежності «тиск – прогин» ( $P^*(\zeta)$ ) в графічному вигляді.

Розглянемо характеристики роботи мембран кришки ТО-82 для деяких можливих значень початкових безрозмірних прогинів  $f_{пч1} = 0,20$  мм,  $\zeta_{пч1} = 1,11$ ;  $f_{пч2} = 0,25$  мм,  $\zeta_{пч2} = 1,39$ ;  $f_{пч3} = 0,30$  мм,  $\zeta_{пч3} = 1,67$ , зображені на рис. 3. Інші геометричні та механічні параметри:  $\delta = 0,18$  мм;  $R = 12$  мм;  $\mu = 0,35$ ;  $E = 190 \cdot 10^9$  Па. Вони відповідають параметрам для маловуглецевої сталі. В цих мембранах  $f_{пч}$  малий по відношенню до  $\delta$ , тому їх відносять до мембран з малим прогином.

З рис. 3 видно, що наявність початкового прогину викликає порушення монотонності ходу кривих. Зі зростанням початкового прогину від  $\zeta_{пч1}$  до  $\zeta_{пч3}$  порушення монотонності ходу кривої зростає. Порушення монотонності свідчить про наявність ділянки нестійкого режиму роботи мембрани. Цей режим роботи має місце в інтервалі між критичними тисками:  $P_1^*$  – тиском втрати стійкості та  $P_2^*$  – тиском розвантаження. Він і є режимом контрольованої втрати стійкості.



**Рисунок 3 – Залежність між тиском та прогином для мембран металевих кришок з початковими прогинами: 1 –  $\zeta_{пч1} = 1,11$ ; 2 –  $\zeta_{пч2} = 1,39$ ; 3 –  $\zeta_{пч3} = 1,67$**

Розглянемо далі деформаційні характеристики мембрани кришки ТО-82 для деяких можливих значень зовнішнього діаметру робочого конуса  $D_2$ , тобто радіусів закріплення контуру мембрани, згідно розрахункової схеми (рис. 2),  $R_1 = 12$  мм,  $R_2 = 13$  мм,  $R_3 = 14$  мм. Інші геометричні та механічні параметри:  $f_{пч} = 0,25$  мм;  $\delta = 0,18$  мм;  $\mu = 0,35$ ;  $E = 190 \cdot 10^9$  Па.

З рис. 4 бачимо, що в зазначеному діапазоні зміни діаметру закріплення контуру мембрани, за сталої товщини жерсті та початкового прогину центра мембрани, характеристики роботи мембран практично не змінюються. Спостерігається однакове для всіх трьох випадків порушення монотонності ходу кривих. На відміну від попереднього випадку (рис. 3) динаміка роботи мембран не зазнає змін.

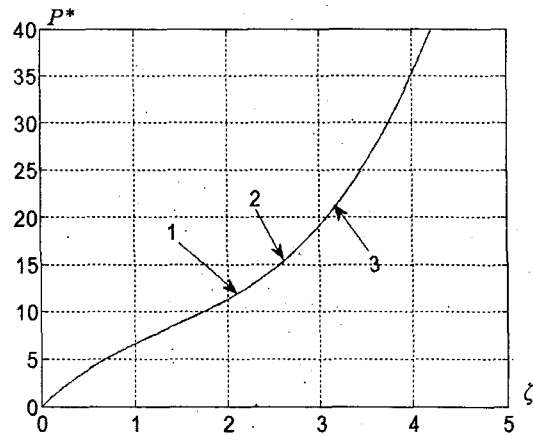


Рисунок 4 – Залежність між тиском та прогином для мембран металевих кришок радіусами: 1 –  $R_1 = 12$  мм; 2 –  $R_2 = 13$  мм; 3 –  $R_3 = 14$  мм

Конструктивно, функціонування мембрани в режимі контрольованої втрати стійкості перш за все пов'язане з жорсткістю опорного конуса (рис. 1). Припустимо, що опорний конус починає втрачати стійкість одночасно з робочим, тоді фактично він стає частиною робочого конусу. При цьому  $f_{nc}$  такого складеного робочого конусу різко зростає (більш ніж у 2 рази) і мембрана з класу мембран з малим прогином переходить у клас мембран з великим прогином [1].

В цьому випадку порушення монотонності ходу кривої  $P^*(\zeta)$  кардинально збільшиться. Інтервал між критичними тисками  $P_1^*$  та  $P_2^*$  розшириться. Тиск  $P_1^*$  зростає, а тиск  $P_2^*$  зменшиться. Зменшившись тиск розвантаження  $P_2^*$  може досягти значення 0, перетнути вісь абсцис і перейти в зону від'ємних значень, тоді мембрана після втрати стійкості і розвантаження початкову форму не відновить і збереже пружний залишковий прогин. Така мембрана в існуючому робочому інтервалі тисків  $P_1$  та  $P_2$  функціонувати не буде.

**Висновки.** Надійне функціонування мембран в режимі контрольованої втрати стійкості забезпечується за умови невеликих порівняно з товщиною значень  $f_{nc}$ . В іншому випадку після втрати стійкості мембрана може перейти в режим пластичних деформацій і зберегти пружний залишковий прогин, втративши функціональність.

Опорний конус за будь-яких обставин не повинен входити в режим контрольованої втрати стійкості інакше мембрана втратить функціональність.

Математична модель в якісному плані відповідає загальній картині роботи мембран і може використовуватись для удосконалення мембран та пояснення їх роботи.

#### Література

1. Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. – М.: Изд-во технико-теоретической лит., 1956. – 419с.
2. P. Frank Pai. (April 2007) Total-Lagrangian Formulation and Finite-Element Analysis of Highly Flexible Plates and Shells. *Mathematics and Mechanics of Solids*, vol. 12, no. 2, 213-250.
3. Ватренко, О.В. Мембрани кришок консервної скляної тари (обґрунтування їх роботи) / О.В. Ватренко // Упаковка. – 2014. – № 6. – С. 26-29.