

Мембрани вакуумних кришок. Моделювання їх роботи

О.В. Ватренко, д.т.н., Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

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 залежно від її стану – втягнутого чи опуклого – свідчить про наявність або відсутність в упаковці вакууму, а отже – про її герметичність, та сигналізує про її початкове відкриття.

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

Питання розрахунку гнучких металевих пластинок розглядаються в теорії пружності. Зокрема, в монографії [1] описана робота круглих гнучких пластинок з початковим прогином, закріплених у різний спосіб, за різних відносно прогину напрямків дії навантаження. Є робота закордонного автора [2], у якій розрахунки гнучких пластин здійснюються методом скінченних елементів, що суттєво ускладнює обчислення, хоча може дати досить точні результати. Стосовно консервної галузі були здійснені дослідження стійкості поля типу III. Було розглянуто питання стійкості поля кришок типу III-82, пов'язане зі зменшенням товщини жерсті [3]. Розраховано критичний тиск на поле для різної товщини та твердості жерсті. Перевірено стійкість кришок для найбільш несприятливих випадків у процесі стерилізації консервів. У роботі [2] здійснено розрахунки та аналіз гнучких пластин, які зазнали великих переміщень. У випадку мембран кришок мають місце невеликі, порівняно з товщиною, переміщення. У дослідженнях, проведених автором раніше [3], поле кришки типу III розглядалося у варіанті без «контрольної кнопки» або її наявністю нехтували. У статті [4] надано опис конструкції

та принципу роботи мембран вакуумних металевих кришок для скляної тари. На базі математичного апарату теорії пластин та оболонки з використанням методів інтегрування наведена методика наближеного розрахунку робочої частини мембрани та отримано рівняння взаємозв'язку тиску, геометричних параметрів та товщини мембрани.

Однак, моделювання деформацій мембран, залежно від зміни їх геометричних параметрів та оцінки роботи

математичної моделі щодо реальних об'єктів, виконано не було.

Мета цієї статті полягає у визначенні характеристик деформації мембран залежно від зміни діаметра робочого конуса, з'ясуванні її впливу на належне функціонування мембран та оцінці роботи математичної моделі, за допомогою якої здійснювалося моделювання. Вакуумні кришки з мембранами виготовляють деякі закордонні фірми. Мембрани функціонують за принципом контрольованої втрати стійкості



ті (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 називатимемо тиском.

У процесі закупорювання та оброблення харчової продукції в скляній тарі та в процесі зберігання готової продукції кришки сприймають зусилля, обумовлені різними за своєю природою факторами. Якщо закупорювання здійснюється під парою, то як наслідок в упаковці створюється початковий вакуум. На рис. 2. показано схему затвора після завершення процесу закупорювання паровакуумним способом та сил, які при цьому діють.

У процесі теплового оброблення продукції виникають інші сили, що діють на поле кришок затворів (рис. 3). Тут можливі два випадки: перший – коли тиск у системі перевищує тиск усередині упаковки (рис. 3а), та другий – коли внутрішній тиск в упаковці перевищує тиск у системі (рис. 3б).

Теплове оброблення продукції може суттєво впливати на роботу мембран. На створення внутрішнього тиску в тарі під час теплового оброблення, окрім температур наповнення, незаповненого простору у верхній частині упаковки та початкового вакууму в упаковці, впливає темпе-

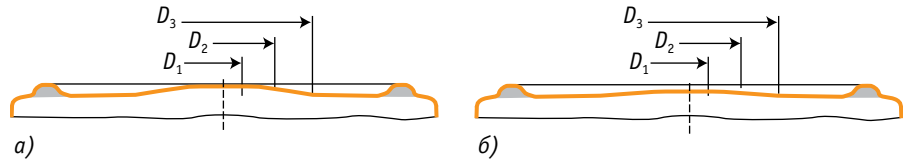


Рис. 1. Поле кришки системи ТО (твіст-офф): а) мембрана в ненавантаженому стані; б) мембрана в стані втрати стійкості

ратура наступної теплової обробки продукції. Зі зменшенням температур наповнення та незаповненого простору внутрішній тиск у тарі під час стерилізації збільшується. Тому, для запобігання відкриттю затвора на етапах теплового оброблення продукції (нагрівання та витримка) здебільшого необхідне відповідне регулювання протитиску системи.

У цілому, в процесі теплового оброблення продукції для кришок більш сприятливим є стале перевищення протитиску. Отже, через залежність внутрішнього тиску в упаковці від умов наповнення та методу теплової обробки між протитиском у системі та внутрішнім тиском в упаковці повинен витримуватися певний сталий перепад.

І нарешті, упродовж всього терміну зберігання готової продукції кришки сприймають певні зусилля, які виникають у результаті паровакуумного способу закупорювання. На рис. 4 показано схему нарізного затвора в процесі зберігання про-

дукції, коли в упаковці утворюється кінцевий вакуум.

Очевидно, що зі схем, наведених на рис. 2, 3 та 4, величина перепаду між тиском у системі чи в зовнішньому середовищі та внутрішнім тиском в упаковці може досягти максимальної величини під час теплового оброблення продукції.

Показники критичних тисків втрати стійкості та відновлення початкової форми, які визначають робочий інтервал функціонування сучасних мембран, загалом відомі і надаються фірмами – виробниками кришок.

Робочою частиною мембрани є пласка кругова ділянка діаметром D_1 та кільцева конічна ділянка з малим кутом нахилу твірної діаметром D_2 (рис. 1). Робоча частина є найбільш чутливою до перепаду тиску і зазнає найбільших деформацій, її називають робочим конусом. Зовні від робочої частини розташована інша кільцева конічна ділянка з більшим кутом нахилу твірної діаметром D_3 , унаслідок чого ця ділянка в процесі функціонування мембрани

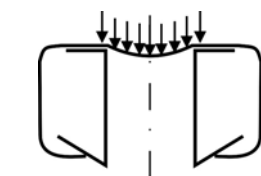


Рис. 2. Схема затвора після завершення процесу паровакуумного закупорювання

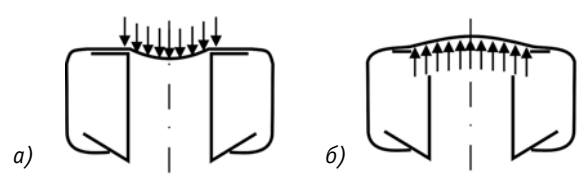


Рис. 3. Схема затвора в процесі теплового оброблення продукції: а) – тиск у системі більше тиску в упаковці, б) – тиск у системі менше тиску в упаковці

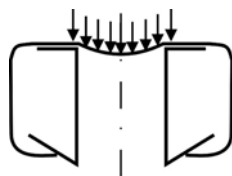


Рис. 4. Схема затвора в процесі зберігання продукції

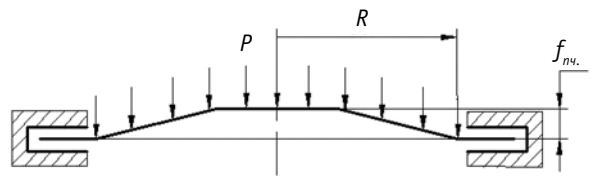


Рис. 5. Схема закріплення мембрани

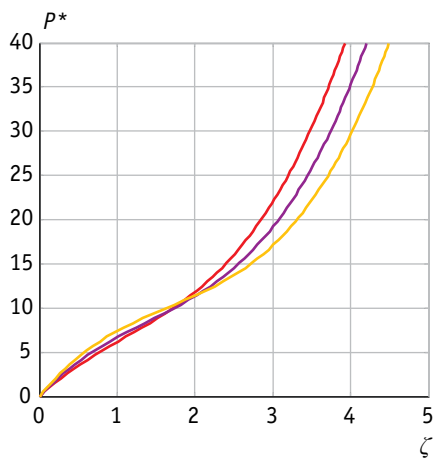


Рис. 6. Залежність тиску від прогину для мембран металевих кришок з початковим прогином: 1,11 (—); 1,39 (—); 1,67 (—)

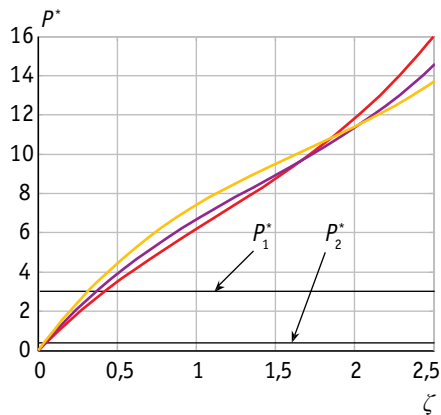


Рис. 7. Робочий інтервал тиску мембран металевих кришок. P_1^* – критичний тиск втрати стійкості; P_2^* – критичний тиск розвантаження

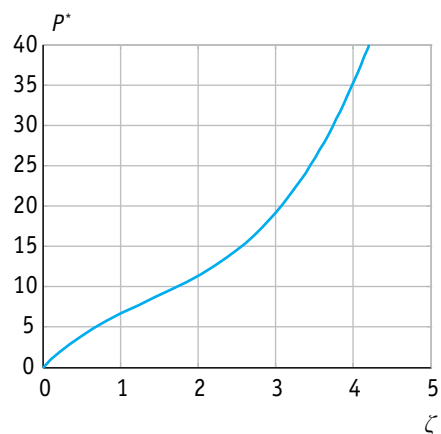


Рис. 8. Залежність тиску від прогину для мембран металевих кришок радіусом: 12, 13 та 14 мм

є менш активною і більш жорсткою. Вона слугує вузлом жорсткості для робочої частини мембрани, тобто виділяє «контрольну кнопку» в окрему функціональну одиницю на полі кришки, її називають опорним конусом.

Робочий конус мембрани стрибкоподібно переходить з одного стану рівноваги (рис. 1а) в інший (рис. 1б). З візуальних спостережень за деформуванням мембран видно, що в момент стрибкоподібного переходу контур з'єднання робочого та опорного конусів на діаметрі D_2 не є абсолютно жорстким. Тому дотримуватимемось розрахункової схеми, у якій робочий конус защемлений за контуром, з вільним радіальним зміщенням точок контура (рис. 5).

Базова математична модель для аналізу роботи мембран, отримана на основі математичної теорії пластин та оболонок з використанням методів інтегрування [4], має вигляд:

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

де $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жор-

сткість мембрани;

f_{nc} , f – початковий та додатковий прогини центра мембрани;

P – тиск (навантаження) на мембрану;

R – радіус контура мембрани ($D_2/2$);

E – модуль нормальної пружності матеріалу мембрани;

δ – товщина мембрани (жерсті);

μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу мембрани.

Після перетворень основне розрахункове рівняння (1) було подано в загальній формі кубічного рівняння, тобто формули Кардано, і набуло вигляду, прийнятого для програмування і комп'ютерного моделювання:

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

де $\zeta_{nc} = \frac{f_{nc}}{\delta}$ 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. На основі формули Кардано було розроблено комп'ютерну програму для розрахунку ζ та P^* і подальшого зображення залежності «тиск – прогин» ($P^*(\zeta)$) у графічному вигляді. У результаті розв'язання кубічного рівняння використовувались лише дійсні корені.

Спочатку розглянемо характеристики роботи мембран кришки ТО-82 для деяких можливих значень початкових безрозмірних прогинів: $f_{nc1} = 0,20$ мм, $\zeta_{nc1} = 1,11$; $f_{nc2} = 0,25$ мм, $\zeta_{nc2} = 1,39$; $f_{nc3} = 0,30$ мм, $\zeta_{nc3} = 1,67$, зображені на рис. 6. 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. У цих мембранах f_{nc} малий відносно δ , тому їх відносять до мембран з малим прогином. З рис. 6 видно, що наявність початкового прогину викликає порушення монотонності кривих. Зі зростанням початкового прогину від ζ_{nc1} до ζ_{nc3} порушення монотонності кривої зростає. Порушення монотонності свідчить про наявність ділянки нестійкого режиму роботи мембрани. Цей режим роботи має місце в певному інтервалі, а саме між критичними тисками: P_1^* – тиском втрати стійкості та P_2^* – тиском розвантаження (рис. 7). Він і є режимом контрольованої втрати стійкості.

Розглянемо далі деформаційні характеристики мембрани кришки ТО-82 для деяких можливих значень зовнішнього діаметра робочого конуса D_2 , тобто радіусів закріплення контура мембрани згідно з розрахунковою схемою (рис. 5): $R_1 = 12$ мм, $R_2 = 13$ мм, $R_3 = 14$ мм. Інші геометричні та механічні параметри: $f_{nc} = 0,25$ мм; $\delta = 0,18$ мм; $\mu = 0,35$; $E = 190 \cdot 10^9$ Па.

З рис. 8 бачимо, що в зазначеному діапазоні зміни діаметра закріплення контура мембрани, за сталої товщини жерсті та початкового прогину центра мембрани, характеристики роботи мембран практично не змінюються. Спостерігається однакове для всіх трьох випадків порушення монотонності кривих. На відміну від попереднього випадку (рис. 6) динаміка роботи мембран не зазнає змін.



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

У цьому випадку порушення монотонності кривої $P^*(\zeta)$ кардинально збільшиться і на кривій з'явиться петля. 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 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 у наявному робочому інтервалі тисків P_1 та P_2 функціонувати не буде.

Висновки

1. Для надійного функціонування мембран у режимі контрольованої втрати стійкості збільшувати $f_{нч}$ слід дуже обережно, оскільки після втрати стійкості мембрана може перейти в режим пластичних деформацій і зберегти пружний залишковий прогин, втративши функціональність.

2. На відміну від робочого, опорний конус у жодному разі не повинен входити в режим контрольованої втрати стійкості, інакше мембрана втратить функціональність.
3. Математична модель у якісному плані відповідає загальній картині роботи мембран і може використовуватись для удосконалення мембран та пояснення їхньої роботи.

Література

1. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. — М.: Изд-во технико-теоретической лит., 1956. — 419 с.
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. Перевірка стійкості поля кришок типу III-82 / О.В. Ватренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / ХДУХТ. — Х. 2009. — Вип. 9. — С. 313–318.
4. Ватренко О.В. Мембрани кришок консервної скляної тари (обґрунтування їх роботи) / О.В. Ватренко // Упаковка. — 2014. — № 6. — С. 26–29. *Ж*

Мембрани вакуумных крышек. Моделирование их работы

А.В. Ватренко, д.т.н.

В статье рассматривается работа упругих мембран металлических крышек стеклянной консервной тары. Математическая модель работы мембраны получена на основе теории пластин и оболочек и преобразована до вида кубического уравнения. Путем компьютерного моделирования получены характеристики работы мембран с учетом их геометрических параметров, толщины и свойств жести в зависимости от изменения начального прогиба и диаметра контура мембраны. Результаты, описывающие работу мембран с помощью модели, согласуются с работой реальных крышек серийного производства.

Ключевые слова: гибкая мембрана; потеря устойчивости; критическое давление; крышка; прогиб.

Membranes of vacuum lids. Simulation their operation

A.V. Vatenko, Dr.

The article examines the operation of the elastic membrane of metal lids of glass container. A mathematical model of the membrane obtained on the basis of the theory of plates and shells and transformed to the form of the cubic equation. By computer simulation performance characteristics of membranes prepared in accordance with their geometric parameters, the thickness and properties of the steel sheet according to the change of the initial deflection and the diameter of the contour of the membrane. The results describing the operation of the membranes using the model consistent with the operation of the actual mass production lids.

Keywords: flexible membrane; loss of stability; critical pressure; lid; deflection.

- Нанесение любого изображения на флаконы и баночки методом шелкографии и тампопечати
- Широкий выбор баночек, тубофлаконов и флаконов для косметики
- Разнообразные цветовые решения и формы
- Создание креатива, разработка оригинал-макета

ЧП «ЛЕКО-ПЛЮС»
Украина, г. Киев, ул. Чистяковская 2-а, оф. 517
Тел./факс (044) 581-56-33
www.leko-plus.com.ua
E-mail: leko-plus@ukr.net