

INFLUENCE OF INERTIAL AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF VACUUM CAPTURING DEVICES ON PERMISSIBLE EFFORTS FOR MAINTENANCE OF CONTAINERIZED ARTIFICIAL CARGO

M. Yakymchuk, O. Gavva, L. Kryvoplyas-Volodina,
S. Tokarchuk, V. Yakymchuk
National University of Food Technologies

Key words:

Vacuum capturing devices
Containerized artificial cargo
Retention forces
Corrugated suction cup

Article history:

Received 02.10.2020
Received in revised form
15.10.2020
Accepted 28.10.2020

Corresponding author:

M. Iakymchuk

E-mail:

mykolaiaakymchuk.2016@gmail.com

ABSTRACT

Revolutionary changes are observed in the designs of modern vacuum capturing devices. These changes are related due to the emergence of new structural materials with improved physical and mechanical properties and technologies for creating complex structures through the usage of 3D printers. The need to create new designs of vacuum capturing devices with advanced functionality is currently very relevant.

In the article the authors considered the possibility of using vacuum capturing devices to perform technological operations in the equipment for moving containerized artificial cargo. A mathematical model has been developed to determine the holding force of containerized artificial cargo and the amount of vacuum in such devices, taking into account additional dynamic loads and physical and mechanical properties of packaging units, which made it possible to ensure their reliable retention. A comparative analysis of the retention efforts of standard and corrugated suction cups has been conducted.

According to the results of analytical studies, it was established that the change in the direction of the inertial force vector increased the retention forces of the containerized artificial cargo by 1.5 times at the same indicators of kinematic and dynamic loads.

The usage of corrugated suction cups provided additional technical capabilities for capturing containerized artificial cargo with a complex configuration of forming surfaces, but was also an additional source of oscillating processes that significantly reduced the retention force of packages up to 40% compared to standard suction cups at the same vacuum values, kinematic and dynamic loads.

It was determined that shifting the axis of the suction cup relative to the center of gravity of the containerized artificial cargo within the core size of the contact cross section led to the significant increase in vacuum in the suction cup by 30% and change the angle of inertia by 40%.

The obtained results can be used to develop new designs of vacuum capturing devices.

DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-5-10

ВПЛИВ ІНЕРЦІЙНИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАКУМНИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НА ДОПУСТИМЕ ЗУСИЛЛЯ УТРИМАННЯ ТАРНО- ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ

М. В. Якимчук, О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна,
С. В. Токарчук, В. М. Якимчук

Національний університет харчових технологій

У конструкціях сучасних вакуумних захоплювальних пристроїв спостерігаються революційні зміни. Ці зміни пов'язані з появою нових конструктивних матеріалів з покращеними фізико-механічними характеристиками і технологій створення складних конструкцій шляхом використання 3Д-принтерів. Потреба створення нових конструкцій вакуумних захоплювальних пристроїв з розширеними функціональними можливостями є наразі дуже актуальною.

У статті розглянуто можливість використання вакуумних захоплювальних пристроїв для виконання технологічних операцій в обладнанні для переміщення тарно-штучних вантажів. Розроблено математичну модель для визначення зусилля утримання тарно-штучних вантажів і величини вакууму в таких пристроях з урахуванням додаткових динамічних навантажень і фізико-механічних властивостей пакувальних одиниць, що надає можливість забезпечити надійне їх утримання. Проведено порівняльний аналіз зусиль утримання стандартних і гофроприсмоктувачів.

За результатами аналітичних дослідження встановлено, що зміна напрямку вектора сили інерції збільшує зусилля утримання тарно-штучного вантажу в 1,5 рази при однакових показниках кінематичних і динамічних навантажень.

Використання гофроприсмоктувачів надає додаткові технічні можливості для захоплення тарно-штучних вантажів зі складною конфігурацією твірних поверхонь і є додатковим джерелом коливальних процесів, які суттєво зменшують зусилля утримання упаковок до 40% порівняно зі стандартними присмоктувачами при однакових показниках величини вакууму, кінематичних і динамічних навантажень.

Визначено, що зміщення осі присмоктувача відносно центру тяжіння тарно-штучного вантажу в межах розмірів ядра перерізу контакту призводить до суттєвого збільшення величини вакууму в присмоктувачі на 30%, а зміна кута дії сили інерції — на 40%.

Отримані результати можуть бути використані для розробки нових конструкцій вакуумних захоплювальних пристроїв.

Ключеві слова: *вакуумні захоплювальні пристрої, тарно-штучний вантаж, зусилля утримання, гофроприсмоктувач.*

Постановка проблеми. Сьогодення пакувальної індустрії характеризується розробкою та використанням великої номенклатури тарно-штучних вантажів.

Такі вантажі мають різні форми, розміри, масу, фізичні та механічні властивості матеріалів тощо [1]. Для переміщення тарно-штучних вантажів у технологічних процесах використовують захоплювальні пристрої [2]. Захоплювальні пристрої призначені для захоплення й утримання в певному положенні об'єктів під час переміщення. Найбільш поширеними є вакуумні захоплювальні пристрої [3]. Однак параметри переміщення тарно-штучних вантажів складної форми вакуумними захоплювальними пристроями потребують уточнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [4; 5] наводиться опис видів захоплювальних пристроїв і методика їх розрахунку. Однак через застосування нових пакувальних матеріалів, зменшення їх товщини та збільшення повітропроникності ці методики потребують доповнення й уточнення.

Дослідження кінематики та динаміки захоплювальних пристроїв як основних елементів промислових роботів, способи розробки алгоритмів їх керування та інші питання автоматизації писані в [5; 6].

Питанням автоматизації технологічних процесів із застосуванням пристроїв маніпулювання штучними об'єктами присвячені праці [7; 8]. Однак наведені конструкції захоплювальних пристроїв і схеми маніпуляторів використовуються для технологічних операцій тільки з металевими виробами і мають обмежене використання в пакувальному обладнанні.

У [9—12] розглянуто застосування пневматичних пристроїв для захоплення виробів. Як робочий агент для таких пристроїв використовують стиснене повітря. Наведені методики розрахунку і підбору пневматичних захоплювальних пристроїв не враховують фізико-механічні властивості пакувальних матеріалів та пакованого харчового продукту і можуть лише наближено використовуватись для проектування пневматичних захоплювальних пристроїв у пакувальній індустрії.

Мета дослідження: математичне моделювання зміни зусилля утримання тарно-штучних вантажів вакуумними елементами з урахуванням кінематичних параметрів вакуумної системи та геометричних розмірів упаковок.

Матеріали і методи. При створенні математичної моделі були прийняті припущення, що матеріал пакованого об'єкта (тарно-штучний вантаж) є досить жорстким тілом, в якому відсутні деформації; еластичний матеріал вакуумного присмоктувача утворює пружний елемент.

Викладення основних результатів дослідження. Після захоплення тарно-штучного вантажу відбувається його переміщення. Типова коливальна система такої конструкції представлена у вигляді двомасової моделі, яка складається із ведучої маси — елементів привода із захоплювальною головкою m_1 та зведеної маси — тарно-штучного вантажу m_2 , з'єднаного пружною ланкою (гофроприсмоктувачем), що має жорсткість $C_{1,2}$ та додатковим компенсуючим елементом $b_{1,2}$ (рис. 1).

Рухійною силою під час піднімання приведеної маси механізму m_1 є сила, $P_{дв}$, а силою опору, яка діє на масу m_2 , є вага вантажу.

Рух мас m_1 та m_2 запишемо у такому вигляді:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = P_{\text{дв}} - C_{1,2}(x_1 - x_2) - b_{1,2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -F_{\text{оп}} + C_{1,2}(x_1 - x_2) - b_{1,2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \end{cases} \quad (1)$$

Конструкція вакуумної захоплювальної головки



Модель коливальної системи

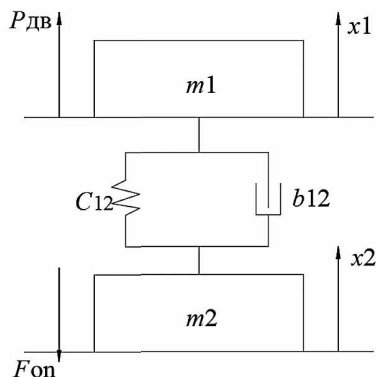


Рис. 1. Модель коливальної системи при використанні вакуумного захоплювального пристрою

Якщо знехтувати перехідними процесами на початковому етапі руху маси m_1 та врахувати, що рух під час піднімання тарно-штучного вантажу, наприклад, є рівноприскореним, то величина середнього значення швидкості $\dot{x}_1 = const = V_1$, тоді $\ddot{x}_1 = 0$. Величина рушійної сили визначається за формулою:

$$P_{\text{дв}} = C_{1,2}(V_1 \cdot t - x_2) - b_{1,2}(\dot{V}_1 - \dot{x}_2). \quad (2)$$

Підставимо рівняння (2) в систему (1) та отримаємо характеристику руху мас m_1 та m_2 :

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} (C_{1,2}(V_1 \cdot t - x_2) + b_{1,2}(\dot{V}_1 - \dot{x}_2) - F_{\text{оп}}) \\ b_{1,2} \cdot \dot{x}_2 + C_{1,2} \cdot x_1 = C_{1,2} \cdot V_1 \cdot t + b_{1,2} \cdot V_1 - P_{\text{дв}} \end{cases} \quad (3)$$

Однак слід зазначити, що конструкції сучасних тарно-штучних вантажів характеризуються використанням великої номенклатури складних форм. І забезпечити їх захоплення в точці, де центр мас збігається з геометричною віссю виробу, досить проблематично. Внаслідок цього в процесі переміщення таких тарно-штучних вантажів на них суттєво збільшується дія крутного моменту M та ймовірність їх відриву від присмоктувача. Тому досліджено вплив крутного моменту від зміщення осі контакту присмоктувача відносно центру тяжіння тарно-штучного вантажу на зусилля його утримання.

Схема переміщення тарно-штучного вантажу вакуумним присмоктувачем за умови зміщення його осі захоплення відносно центру тяжіння наведена на рис. 2.

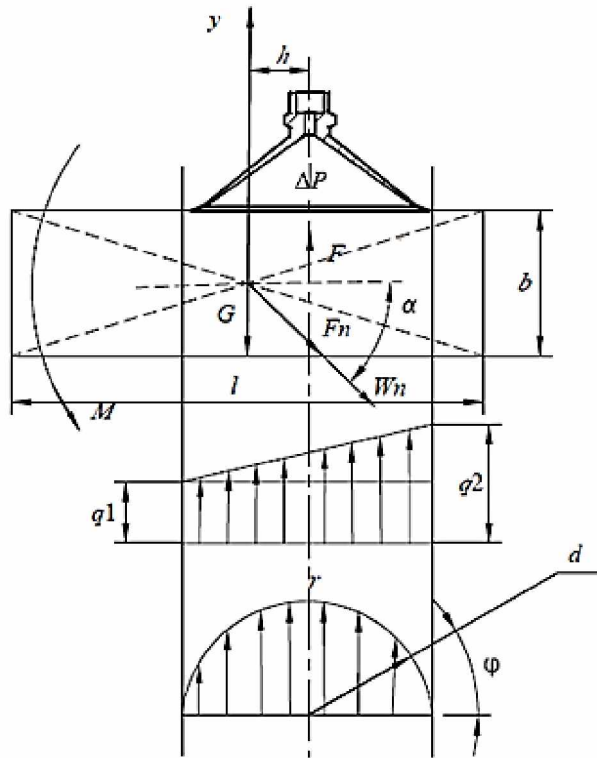


Рис. 2. Схема захоплення тарно-штучного вантажу вакуумним присмоктувачем за умови зміщення його осі відносно центру тяжіння

Припустимо, що центр тяжіння тарно-штучного вантажу зміщений відносно осі присмоктувача на величину h . Тоді на присмоктувач із боку вантажу масою m_2 діє сила інерції $F_{ін}$, а також зовнішній момент сил, який перерозподіляє тиск присмоктувача на поверхню вантажу, величина якого залежить від його ваги і відстані від центру тяжіння вантажу до осі присмоктувача. Розподілення тиску показано у вигляді епюри (рис. 2).

З епюри видно, що найменший тиск q_1 визначає зону ймовірного відриву контакту присмоктувача від тарно-штучного вантажу.

Зміна тиску з \max до \min визначається з рівняння:

$$q = q_0 + \frac{M_r}{I_r} r_\phi, \quad (4)$$

де $q_0 = \frac{4(F - (G_B + F_{ін} \sin \alpha) + W_{II} \sin \alpha_{II})}{\pi d^2}$ — середнє значення тиску за умови його

рівномірного розподілення; r_ϕ — кутова координата, яка описує зону зміни тиску: $-d/2 < r_\phi < +d/2$; d — діаметр присмоктувача; I_r — момент інерції опорної

площини $I_p = SR^2$, де R — радіус інерції відносно площі опорної поверхні; M_r — момент від зовнішніх навантажень відносно поверхні контакту. При використанні вакуумних присмоктувачів отримуємо кільцеву опорну поверхню, радіус інерції якої визначається за формулою [4] (рис. 2):

$$R^2 = \frac{D^2}{16} \left[1 + \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right], \quad (5)$$

де D, D_1 — діаметри зовнішнього та внутрішнього кільця контакту присмоктувача з упаковкою.

Момент інерції опорної кільцевої поверхні між присмоктувачем і поверхнею вантажу:

$$I_p = SR^2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_1^2) \cdot \frac{D^2}{16} \left[1 + \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right] = \frac{\pi}{64} (D^4 - D_1^4). \quad (6)$$

Прийmemo припущення, що закон розподілення тиску по периметру буртика присмоктувача з матеріалом упаковки є лінійним. Тоді мінімальний і максимальний тиск відповідно до рівняння (10) визначається:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{4(F - (G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{п}} \sin \alpha))}{\pi d^2} - \left(\frac{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha)h}{I_p} - \frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha b}{2I_p} \right) \frac{d}{2} \\ q_2 = \frac{4(F - (G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{п}} \sin \alpha))}{\pi d^2} + \left(\frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha \cdot b}{2I_p} + \frac{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha)h}{I_p} \right) \cdot \frac{d}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$I_p = SR^2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_1^2) \cdot \frac{D^2}{16} \left[1 + \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right] = \frac{\pi}{64} (D^4 - D_1^4)$$

Умова надійного контакту присмоктувача з тарно-штучним вантажем має вигляд:

$$q_1 > 0. \quad (8)$$

Руйнування контакту між присмоктувачем і тарно-штучним вантажем буде характеризувати початок процесу відриву, який почнеться при умові $q_1 = 0$. Величину вакууму в присмоктувачі на початок процесу відриву визначимо з рівняння:

$$\frac{4(F - (G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{п}} \sin \alpha))}{\pi d^2} - \left(\frac{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha)h}{I_p} - \frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha b}{2I_p} \right) \frac{d}{2} = 0. \quad (9)$$

Після відповідних перетворень отримуємо:

$$\Delta p = \left(\frac{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha)h}{I_p} - \frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha \cdot b}{2I_p} \right) \frac{d}{2} + \frac{4(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{п}} \sin \alpha)}{\pi d^2}. \quad (10)$$

Якщо значення вакууму задане, то з рівняння (10) визначимо максимальне зміщення центру мас тарно-штучного вантажу відносно осі присмоктувача:

$$h \leq \frac{2I_p}{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha)d} \left(\Delta p - \frac{4(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{п}} \sin \alpha)}{\pi d^2} \right) + \frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha b d}{4I_p}. \quad (11)$$

З рівняння (11) видно, що величина зміщення центру тяжіння тарно-штучного вантажу відносно осі присмоктувача залежить від діаметра присмоктувача, маси вантажу, напрямку вектора та величини прискорення. Для його зменшення до-

цільно використовувати одночасно декілька присмоктувачів, які синхронно виконують операцію захоплення тарно-штучного вантажу, а їх раціональне розташування по поверхні упаковки забезпечить компенсацію дії зовнішніх моментів сил.

З іншого боку, зміщення осі вакуумної присоски відносно центру тяжіння (рис. 2) призводить до зміни значень тисків q_1, q_2 , і, як наслідок, форми епюри (наприклад, рис. 3). У результаті контакту присмоктувача по опорній кільцевій площині всередині неї утворюється площина тиску, яка називається ядром перерізу [4].

Розмір ядра перерізу для кільцевої поверхні визначаємо з рівняння [7]:

$$r_{\text{я}} = \frac{D}{8} \left[1 + \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Тоді умова надійного контакту між присмоктувачем і тарно-штучним вантажем має вигляд:

$$r_x < r_{\text{я}}, \quad (13)$$

де r_x — координата результуючої сили Q площі епюри тиску (рис. 3).

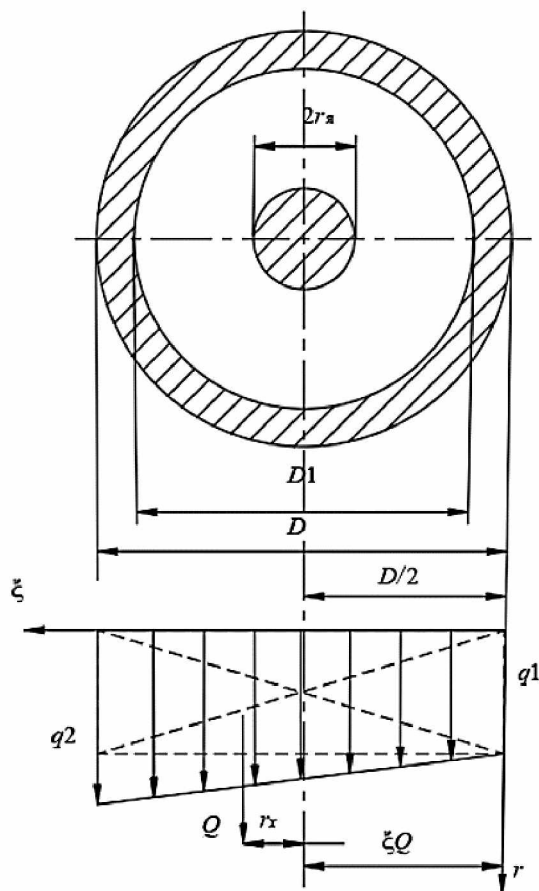


Рис. 3. Схема розподілення тиску по площі контакту в процесі переміщення тарно-штучного вантажу вакуумним присмоктувачем

Для визначення координати прикладання сили Q розглянемо площу епюри тиску, яка складається з прямокутника і трикутника. Відповідно, площі фігур визначимо з рівнянь: $S_1 = q_1 \cdot D$; $S_2 = \frac{1}{2}(q_1 - q_2) \cdot D$. (14)

Координату сили Q визначаємо з рівняння:

$$\xi_Q = \frac{S_1 \cdot \xi_1 + S_2 \xi_2}{S_1 + S_2}, \quad (15)$$

де $\xi_1 = D / 2$; $\xi_2 = \frac{2}{3} D$ — координати центру мас фігур, з яких складається епюра.

Підставимо вирази (14) та (15) у вираз (12) та з рис. 3 визначимо координату

$$r_x = \xi_Q - \frac{D}{2} = \frac{q_1 \cdot D \cdot \frac{D}{2} + \frac{2}{3} D \frac{1}{2} (q_2 - q_1) \cdot D}{q_1 \cdot D + \frac{1}{2} (q_2 - q_1) \cdot D} - \frac{D}{2}. \quad (16)$$

Після відповідних перетворень рівняння (16) має вигляд:

$$r_x = \frac{D \cdot (q_1 - 3q_2)}{6}. \quad (17)$$

Підставимо рівняння (17) та рівняння (12) в рівняння (11) та отримаємо максимальне зміщення центру мас упаковки відносно осі присмоктувача:

$$h < \left[\left(1 + \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right) \frac{6}{8} - \frac{16(F - (G + F_{\text{ін}} \sin \alpha + W_{\text{II}} \sin \alpha))}{\pi d^2} - \frac{F_{\text{ін}} \cos \alpha b d}{2I_p} \right] \cdot \frac{I_p}{(G + F_{\text{ін}} \sin \alpha) d}. \quad (18)$$

Результати аналітичних досліджень зусилля утримання тарно-штучного вантажу вакуумним присмоктувачем представлено у вигляді графіка на рис. 4.

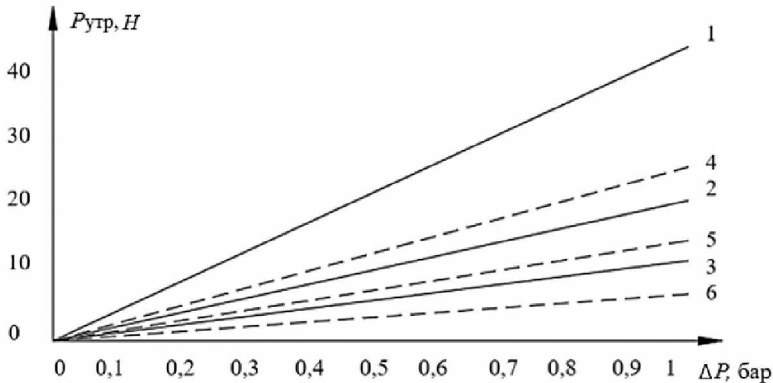


Рис. 4. Графік залежності зусилля утримання $P_{\text{утр}}$ від перепаду тиску ΔP у вакуумному захоплювальному елементі для тарно-штучного вантажу з коробкового картону під час його піднімання при:

$\alpha = 90^\circ$ для діаметрів присмоктувача: 1 – $d = 30$ мм; 2 – $d = 20$ мм; 3 – $d = 15$ мм; $\alpha = 30^\circ$ для діаметрів присмоктувача 4 – $d = 30$ мм; 5 – $d = 20$ мм; 6 – $d = 15$ мм

Порівняльна характеристика зусилля утримання між стандартними і гофроприсмоктувачами (рис. 5).

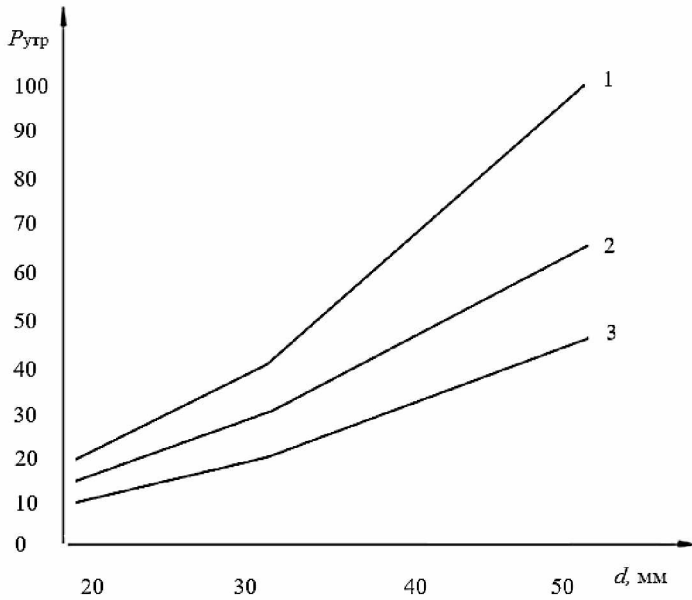


Рис. 5. Зміна зусилля утримання залежно від діаметрів присмоктувачів:
 1 — стандартним присмоктувачем; 2 — гофроприсмоктувачем з 1,5-гофро;
 3 — гофроприсмоктувачем з 3,5-гофро

Результати теоретичних досліджень впливу розташування осі присмоктувача відносно центру тяжіння тарно-штучного вантажу та кута дії сили інерції на розрідження всередині присмоктувача наведено на рис. 6.

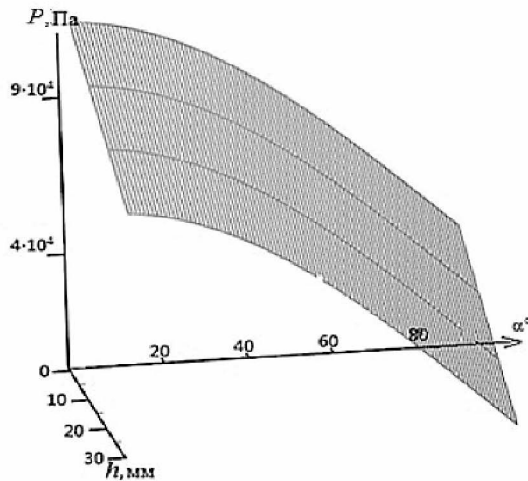


Рис. 6. Зміна розрідження в присмоктувачі (ΔP , Па) як функції зміщення його осі розташування відносно центру тяжіння тарно-штучного вантажу (h , мм) та кута дії сили інерції (α°)

Висновки

За результатами аналітичних дослідження встановлено, що зміна напрямку вектора сили інерції (при $30 \leq \alpha \leq 90$) збільшує зусилля утримання тарно-штучного вантажу в 1,5 раза при однакових показниках кінематичних і динамічних навантаженнях.

Використання гофроприсмоктувачів забезпечує додаткові технічні можливості для захоплення тарно-штучних вантажів зі складною конфігурацією твірних поверхонь і є додатковим джерелом коливальних процесів, які суттєво зменшують зусилля утримання упаковок до 40% порівняно зі стандартними присмоктувачами при однакових показниках величини вакууму, кінематичних і динамічних навантаженнях.

Визначено, що зміщення осі присмоктувача відносно центру тяжіння тарно-штучного вантажу в межах розмірів ядра перерізу контакту призводить до суттєвого збільшення величини вакууму в присмоктувачі на 30%, а зміна кута дії сили інерції — на 40% (рис. 6).

Література

1. Пакувальне обладнання: підручник / О. М. Гавва та ін. К.: ІАЦ Упаковка, 2010. 746 с.
2. Гавва О. М., Беспалько А. П., Волчко А. І. Пакувальне обладнання. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару. К.: ІАЦ Упаковка, 2008. 436 с.
3. Якимчук М. В., Гавва О. М., Якимчук В. М. Захоплювальні пристрої для пакувальної індустрії. *Упаковка*. 2020. № 4, 5. С. 48—51.
4. Огений Я. Н., Ольштынський П. В. Выбор и расчет захватных устройств промышленных роботов: учебное пособие. Волгоград: ВолГТУ, 2000. 64 с.
5. Основи САПР пакувального обладнання: навч. посіб. / Б. О. Пальчевський та ін.; за ред. проф. Б. О. Пальчевського. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2008. 160 с.
6. Пальчевський Б. О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів): навч. посіб. Львів: Світ, 2007. 392 с.
7. Волчко А. И. Повышение технического уровня линий укладки штучных грузов пищевой промышленности в транспортную тару: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.14. К., 1986. 286 с.
8. Miyake T., Ishihara H., Tomino T. Vacuum-based wet adhesion system for wall climbing robots-lubricating action and seal action by the liquid. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. ROBIO 2008. Bangkok, Thailand: IEEE, 2009.
9. Brown E., Rodenberg N., Amend J., et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. 107.44. P. 18809—18814.
10. Amend J. R., Brown E., Rodenberg N., et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Trans Rob*. 2012. 28(2). P. 341—350.
11. Tomokazu T., Kikuchi S., Szuki M., et al. Vacuum gripper imitated octopus sucker-effect of liquid membrane for absorption. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany: IEEE, 2015.
12. SMC Vacuum Pad Series ZP3E. *JAPAN: SMC Corporation. Web Catalog*. P. 385.