

УДК: 621.798.3:004.4 (043.3)

## DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE BIONIC GRIPPING DEVICE BASED ON COAXIAL SHELLS

**O. Chentsov, M. Iakymchuk***National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

bionic gripping devices,  
packaged food products,  
mathematical modeling,  
holding force,  
vacuum

**Article history:**

Received 13.02.2025

Received in revised form  
12.05.2025

Accepted 14.05.2025

**Corresponding author:**

chentsovov@gmail.com

---

**ABSTRACT**

This study explores the development of an adaptive bionic gripping device inspired by the anatomical and functional characteristics of the marine polychaete worm *Glycera Phyllodocida*. This organism's unique ability to evert its jaw structure for prey capture has served as a biological model for designing a novel robotic gripper. The proposed design is based on a series of coaxial elastomeric shells capable of inverting and returning to their original form through pneumatic actuation. The gripper incorporates a guiding cylinder to control the inversion direction, concentric reinforcement ribs to regulate membrane deformation, and a variable wall thickness for enhanced adaptability.

The device demonstrates a high level of conformity to objects with diverse geometries and materials. The gripping process is divided into three stages: initial contact, membrane wrapping, and retention, ensuring secure holding with minimal deformation of the target object. Experimental validation has confirmed the effectiveness of the device in handling cylindrical, conical, and spherical samples with diameters ranging from 92% to 116% of the guiding cylinder's diameter.

Furthermore, mathematical modeling has been employed to predict gripping forces, membrane behavior under varying internal pressures, and the effect of membrane stiffness and geometry on operational efficiency. Integration of vacuum assistance enhances retention strength, especially for heavier objects, and improves membrane retraction speed.

The findings highlight the potential of this bioinspired gripper for use in food processing and packaging industries, where objects of varying sizes and delicate surfaces must be handled with precision and adaptability. Compared to traditional rigid or pneumatic soft grippers, the developed prototype provides a balanced combination of flexibility, structural stability, and control.

This research contributes a promising advancement in the field of soft robotics and biomimetic engineering, paving the way for the design of next-generation adaptive manipulators suitable for real-world applications.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-16

---

## РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО БІОНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ЗАХОПЛЕННЯ НА ОСНОВІ КОАКСІАЛЬНИХ ОБОЛОНОК

О. В. Ченцов, аспірант, ORCID ID: 0009-0002-3677-4035

М. В. Якимчук, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-1905-3546

Національний університет харчових технологій

*У статті наведено результати дослідження адаптивного біонічного пристрою захоплення, який копіює принцип функціонування живого організму *Glycera Phyllodo-cida*. Запропонована конструкція пристрою захоплення базується на коаксіальних оболонках, що мають здатність до трансформації одна в іншу. Результатами дослідження встановлення залежності між силою захоплення та характеристиками об'єкта захоплення: розміру, форми та геометрії поверхні. Авторами виготовлено прототип пристрою захоплення, перевірено адекватність роботи та підтверджено високий ступінь адаптивності до захоплення об'єктів різних форм.*

**Ключові слова:** біонічні пристрої захоплення, паковані харчові продукти, математичне моделювання, зусилля утримання, вакуум.

**Постановка проблеми.** Для подолання існуючих обмежень пристроїв захоплення харчових виробів, які мають труднощі захоплення та утримання пакованих харчових продуктів при зміні їх форм, розмірів і характеристик, виникає необхідність у розробці нових конструктивних рішень. Традиційні жорсткі пристрої захоплення демонструють низьку ефективність, наприклад, при маніпулюванні складними за формою упаковками, що суттєво обмежує їхнє використання.

У цьому контексті звернення до природних організмів, які мають високу адаптивність і ефективність до захоплення та утримання різних за формою об'єктів, є перспективним підходом.

Природні аналоги, такі як рухи хобота слона, щупальця восьминога, лапи гекона чи язик хамелеона, слугують джерелом натхнення для інженерних рішень. Унікальні біологічні особливості цих організмів демонструють, як можна ефективно адаптуватися до захоплення об'єктів різної форми та матеріалу. Особливою моделлю універсального пристрою захоплення є рука людини, яка відзначається гнучкістю, чутливістю та швидкодією.

Однак навіть серед різноманітних конструкцій біонічних пристроїв захоплення існують проблеми. Наприклад, м'які багатопальцеві пристрої захоплення, активовані стисненим повітрям, демонструють гарну адаптивність і безпеку, але недостатню жорсткість кінцевих ефекторів, що обмежує їх здатність працювати з великими по масі або «м'якими» упаковками.

А тому для вирішення існуючих задач в харчовій промисловості є нагальна необхідність у створенні нових інноваційних пристроїв захоплення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових праць дав змогу зробити висновок, що запропоновані підходи до проєктування біонічних пристроїв захоплення на базі тороподібних гідростатів, не дають належного ефекту, тому що призводять до значного збільшення їх габаритів, потребують складної системи керування та мають невеликі зусилля затискання. Спрощено принцип роботи пристрою захоплення на основі тороподібного гідростату пояснено у праці [10]. При-

стрій, розглянутий в [1], має жорсткий зовнішній каркас і жорсткі механізми керування, що відповідають за рух тороподібного гідростату. На відміну від нього, пристрій [9] не має жорстких елементів органу захоплення, але керується складною системою приводів і має обмеження у керуванні напрямку інверсії органу захоплення. Рух поверхні тороподібного гідростату пристрою захоплення [2] зумовлений переміщенням декількох тросів, що пропущені через вісь органу захоплення. Це накладає обмеження на габарити пристрою, яке зумовлене наявністю складної системи жорстких шківів.

У праці [3] розглянуто біонічний пристрій захоплення, що імітує роботу перистальтики стравоходу шляхом симетричного скорочення та послаблення «м'язів» через переміщення об'єкта вздовж осі пристрою. Автор досліджень стверджує, що такі системи ефективні лише за умови низького тертя між стінками пристрою захоплення та об'єктом з постійним зовнішнім змащенням. У праці [4] розглянуто принцип пневматичної інверсії внутрішньої трубчастої мембрани, який був застосований у ліаноподібному пристрої захоплення, що імітує механізм росту рослин для навігації у невідомому середовищі. Схожий за принципом дій механізм, що досліджується у [8], має спільні з ним риси, але демонструє здатність м'якого механізму до просування крізь отвори, значно менші за габарити пристрою. Пристрій захоплення з телескопічними пальцями [5] та [6], що виготовлені з м'якого еластомеру, демонструє здатність до подовження робочих органів захоплення шляхом багатоступеневого вивертання силфоноподібних мембран під дією тиску, але кінцева результативна сила захоплення обмежена лише силою тертя між невеликим кінцевими сегментами. В основі біонічного пристрою захоплення, дослідженого в [11], лежить живий прототип того самого організму *Glycera Phyllodocida*, але його характерною рисою є застосування жорстких елементів конструкції та кінцевого ефектора, що складається за принципом оригамі. Серед усього різноманіття наявних пристроїв захоплення, що побудовані на базі живих прототипів [12], на окрему увагу заслуговує пристрій, що копіює поведінку міноги при захопленні об'єкта [15]. Комбінація двох етапів захоплення за допомогою вакууму та радіальне обтискання об'єкта гарантує виску ефективність, але обов'язковою умовою для початку його роботи є занурення об'єкта захоплення у внутрішню порожнину пристрою. Той самий принцип роботи застосовано у пристрої, що описаний у [13], але тут його використано для навігації у невідомому середовищі.

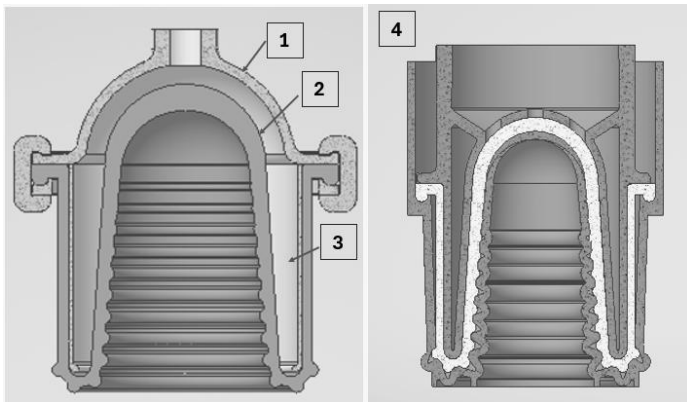
Спільною рисою більшості конструкцій наведених біонічних пристроїв захоплення є внутрішні стінки, які рухаються одночасно з об'єктом. Такі пристрої побудовані на базі тороподібного гідростату заповненого рідиною та активуються шляхом механічного переміщення. Недоліком таких пристроїв є складність форм конструкції і, як наслідок, великі витрати на виготовлення, що унеможлиблює їх комерційне застосування.

**Мета дослідження:** визначення функціональних характеристик запропонованого біонічного пристрою захоплення з подальшою оптимізацією його конструкції, що передбачає використання елементів жорсткого ендоскелету, впровадження концентричних ребер жорсткості на поверхні еластомерних оболонок і збільшення адгезії шляхом структурування контактної поверхні.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження є характеристики біонічного пристрою захоплення методами проведення активного експерименту, спрямованого на опис умов утримання упаковок з харчовим продуктом різних форм і розмірів.

**Результати та обговорення.** Філософія роботи запропонованого біонічного пристрою ґрунтується на функціонування живого організму *Glycera Phyllodocida*. *Glycera Phyllodocida* — це морський поліхетний черв'як, який належить до класу багатощетинкових кільчастих червів (*Polychaeta*) і родини *Glyceridae*. Цей організм є частиною морських екосистем і зустрічається переважно в прибережних водах океанів. Він має унікальну анатомію та поведінкові особливості. Для біомеханіки та біоінженерії цікавим є будова *Glycera* та функціонування його стравоходу зі щелепами, які знаходяться всередині тіла і можуть вивертатися назовні через дистальний отвір, щоб захопити їжу, а потім згортатися назад для транспортування їжі всередину організму. Характерні особливості будови його тіла розглянуті у [8].

Філософія роботи запропонованого біонічного пристрою захоплення передбачає, що переміщення мембрани 2 (рис. 1) відбувається прикладеним тиском. При цьому переміщення мембрани при її розгортанні зумовлюється варіюванням товщини стінок і зміною геометрії мембрани. Спостерігається зменшення товщини стінок мембрани від центру до периферії. Для уникнення надмірного роздуття сегментів мембрани при розгортанні запропоновано установку допоміжних ребер жорсткості, що надає процесу розгортання східчастий характер.



**Рис. 1.** Запропоновані конструкції біонічного пристрою захоплення.

Елементи конструкції: 1 — жорсткий корпус; 2 — еластична мембрана; 3 — внутрішня напрямна; 4 — литтєва форма мембрани

Характерною рисою запропонованої конструкції біонічного пристрою захоплення від наявних конструкцій є використання коаксіально розташованих циліндричних сегментів мембрани та циліндричної напрямної 3 (рис. 1), яка дає змогу контролювати напрямок інверсії. Тиск повітря, прикладений до мембран зсередини, поступово вивертає її, а напрямна скеровує напрямок деформації. При скиданні тиску повітря з біонічного пристрою захоплення мембрана, під дією пружних сил, повертається до початкового стану.

Особливістю конструкції запропонованого біонічного пристрою захоплення є різниця в товщині між внутрішньою та зовнішньою стінкою мембрани, що запобігає втраті стійкості внутрішньої частини та сприяє ефективності процесу захоплення (рис. 2, 3).

Результати математичного моделювання дали змогу визначити залежності щодо геометрії мембрани (рис. 4) та розміру об'єкта захоплення.

За результатами моделювання було виготовлено експериментальні зразки запропонованого біонічного пристрою захоплення та побудовано дослідну установку для оцінки параметрів пристрою. Для виготовлення мембран були використані силікони на платиновому каталізаторі твердістю в діапазоні від 15HSA до 20HSA.

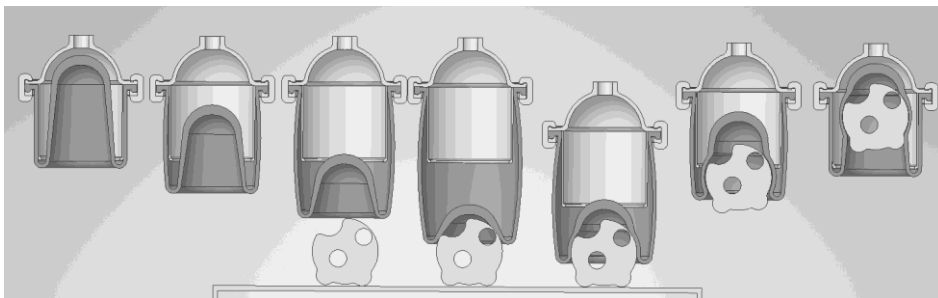


Рис. 2. Процес захоплення об'єкта біонічним пристроєм захоплення за умов, коли розмір об'єкта менший за діаметр внутрішньої прямої мембрани

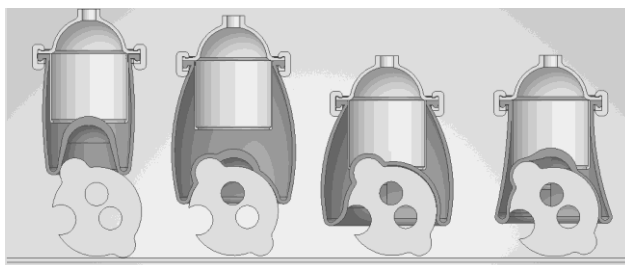


Рис. 3. Процес захоплення об'єкта біонічним пристроєм захоплення за умов, коли розмір об'єкта перевищує діаметр внутрішньої прямої мембрани

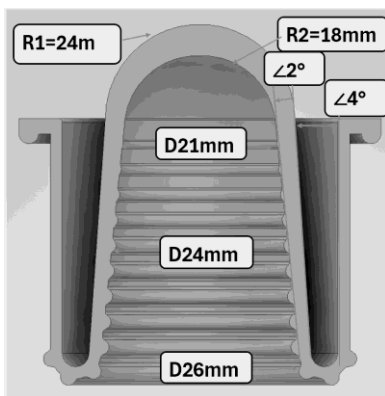


Рис. 4. Геометричні розміри мембрани для запропонованої конструкції біонічного пристрою захоплення

Стратегія захоплення біонічним пристроєм передбачає три основні етапи, які забезпечують ефективне та надійне утримання упаковок з харчовим продуктом без деформації їх форм.

На першому етапі початкового контакту пристрою захоплення з об'єктом сила, що генерується внутрішнім тиском повітря, прикладається до поверхні упаковки. Як показують дослідження, величина цієї сили значно менша за опір матеріалу поверхні

упаковки, що дає змогу уникнути будь-яких її пошкоджень. Крім цього, слід зазначити, що рівномірне розподілення зусилля захоплення по поверхні упаковки забезпечує надійний контакт елемента захоплення з об'єктом.

На другому етапі відбувається огортання упаковки зовнішньою стінкою мембрани. Конструкція мембрани дає змогу компенсувати надмірний тиск, що може виникати при зануренні упаковки в порожнину мембрани. При цьому розподілення зусилля мембрани по поверхні упаковки залишається постійним, а площа контакту мембрани з її поверхнею суттєво збільшується, що додатково захищає об'єкт від пошкоджень.

На третьому етапі відбувається утримання упаковки. Для цього припиняється подача повітря і мембрана повертається до свого початкового стану, втягуючи упаковку всередину. Завдяки особливим характеристикам еластичності матеріалу мембрани вона легко адаптується до форми та матеріалу поверхні упаковки. Утримання упаковки забезпечується комбінованим зусиллям шляхом одночасного притискання та дії сил тертя, що виникає між поверхнею упаковки та внутрішньою стінкою мембрани.

Для зменшення часу роботи біонічного пристрою захоплення на етапі повернення мембрани до початкового стану після відпускання упаковки пропонується використовувати асистування вакуумом. Використання вакууму також дає змогу ефективно захоплювати упаковки великої ваги шляхом зменшення еластичності мембрани під дією внутрішнього розрідження, що підвищує її опір до вивертання.

Приклади утримання об'єктів різної форми та матеріалів за допомогою біонічного пристрою наведено на рис. 5.



**Рис. 5. Способи утримання різних за формами та матеріалами об'єктів біонічним пристроєм захоплення:** 1 — скляна куля; 2 — дерев'яна куля; 3 — упаковка з картону; 4 — гладкий пластиковий корпус; 5 — паперовий конус; 6 — резиноподібне покриття; 7 — пластикова місткість з рідиною; 8 — паперовий багатокутник; 9 — гладка скляна поверхня

За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що пристрій надійно захоплює та утримує об'єкти, розмір яких або розмір частини їхньої поверхні, яка використовується для захоплення, перебуває в межах від 92% до 116% від діаметра жорсткої внутрішньої напрямної. Винятком становлять об'єкти, матеріал поверхні яких має великий коефіцієнт тертя при взаємодії з силіконовою гумою, з якої виготовлена мембрана.

Експериментально було досліджено роботу біонічного пристрою захоплення із зразками, що мають різну геометрію, зокрема циліндром, сферою та усіченим конусом, який повторює геометрію внутрішніх стінок мембрани. Визначено, що для досліджених розмірів пристрою максимальне розкриття внутрішньої напрямної становить 32 мм, жорсткість мембрани дорівнює 15 HSA, а ребра жорсткості мають діаметр 2 мм та поверхню, структуровану додатковими зачіпами довжиною 2 мм. З урахуванням товщини стінок мембрани максимальний діаметр зразка, який може бути занурений у порожнину пристрою, становить 28 мм.

Експериментально досліджено, що максимальна здатність до утримання без використання асистування вакуумом залежить від власної еластичності мембрани. Застосування вакууму допомагає збільшити силу утримання, однак її величина суттєво впливає на мінімальний розмір упаковки, оскільки внутрішня частина мембрани розширюється під дією атмосферного тиску ззовні.

На другому етапі були проведені експериментальні дослідження щодо визначення сили утримання об'єктів різної форми та розмірів біонічним пристроєм захоплення. Результати дослідження наведені на графіку на рис. 6—8.

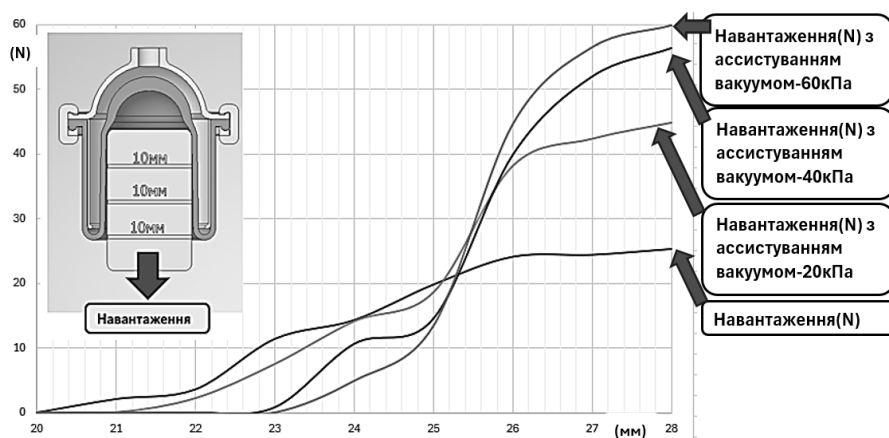


Рис. 6. Графік залежності зусилля утримання від діаметра дослідженого зразка циліндричної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму

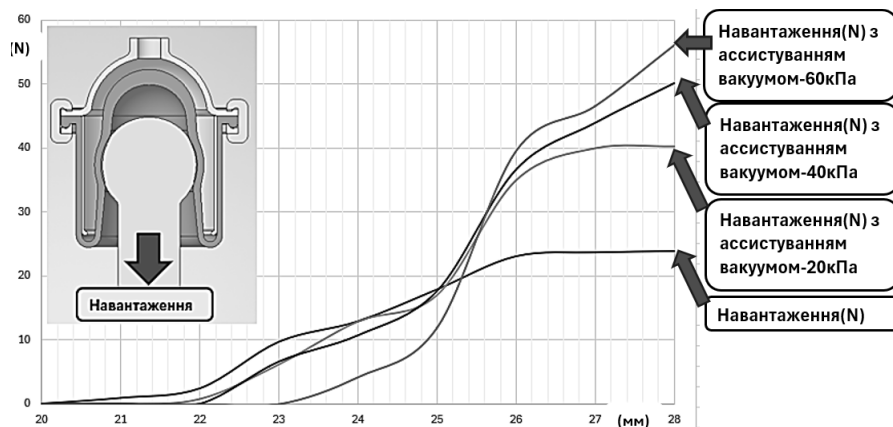
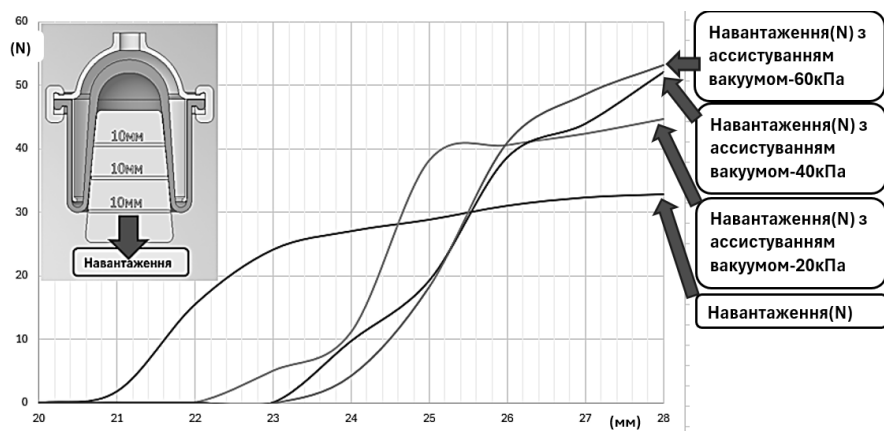


Рис. 7. Графік залежності зусилля утримання від діаметра дослідженого зразка сферичної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму



**Рис. 8. Графік залежності зусилля утримання від діаметра (по середній лінії) дослідженого зразка конусної форми (мм) та глибини асистуючого вакууму**

Результати тестування показали, що найбільшу силу утримання біонічний пристрій захоплення демонструє у взаємодії зі зразками циліндричної форми, діаметр яких знаходиться у межах від 92% до 116% від середнього значення внутрішнього діаметра мембрани для всіх режимів роботи.

Зведені результати експериментальних досліджень щодо надійності утримання об'єктів різноманітних форм, розмірів і матеріалів наведені в табл. 1.

**Таблиця 1. Надійність утримання об'єктів різноманітних форм, розмірів і матеріалів**

| № п/п | Об'єкт                                                           | Кількість спроб | Кількість вдалих спроб | Надійність утримання, % |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 1.    | Скляна куля Ø 21 мм                                              | 20              | 20                     | 100                     |
| 2.    | Акриловий багатокутник 21 мм                                     | 20              | 20                     | 100                     |
| 3.    | Дерев'яна куля Ø 40 мм                                           | 20              | 15                     | 75                      |
| 4.    | Прямокутна картонна упаковка 40 мм×20 мм×20 мм, торцева поверхня | 20              | 20                     | 100                     |
| 5.    | Пластиковий корпус прямокутний 50 мм×30 мм×25 мм                 | 20              | 17                     | 85                      |
| 6.    | Флакон зі сферичною пластиковою кришкою Ø 25 мм                  | 20              | 20                     | 100                     |
| 7.    | Великий флакон із циліндричною пластиковою кришкою Ø 23 мм       | 20              | 16                     | 80                      |
| 8.    | Флакон з металевою кришкою Ø 22 мм                               | 20              | 20                     | 100                     |
| 9.    | Акрилова іграшка складної форми                                  | 20              | 19                     | 95                      |
| 10.   | Конус паперовий 35°                                              | 20              | 15                     | 75                      |
| 11.   | Конус паперовий 50°                                              | 20              | 20                     | 100                     |
| 12.   | Конус паперовий 65°                                              | 20              | 20                     | 100                     |
| 13.   | Конус паперовий 80°                                              | 20              | 18                     | 90                      |
| 14.   | Конус паперовий 90°                                              | 20              | 16                     | 80                      |
| 15.   | Шестигранна піраміда паперова 35°                                | 20              | 15                     | 75                      |
| 16.   | Шестигранна піраміда паперова 50°                                | 20              | 19                     | 95                      |
| 17.   | Шестигранна піраміда паперова 65°                                | 20              | 20                     | 100                     |
| 18.   | Шестигранна піраміда паперова 80°                                | 20              | 17                     | 85                      |
| 19.   | Шестигранна піраміда паперова 90°                                | 20              | 12                     | 60                      |



У взаємодії з об'єктами складної форми (табл. 1) найкращі результати біонічний пристрій захоплення демонструє з об'єктами, які частково були занурені всередину робочої порожнини, включаючи об'єкти значно більшого розміру за робочу камеру пристрою, зокрема експериментально встановлено, що у взаємодії зі зразками «конус» і «піраміда» найкращі результати отримані для зразків з кутом при вершині, що полягає у межах від  $50^\circ$  до  $80^\circ$  для обох зразків.

Матеріал об'єкта захоплення суттєво впливає на якість його утримання. На початкових етапах досліджень встановлено, що взаємодія запропонованого біонічного пристрою захоплення зі скляними, полімерними та пластиковими поверхнями забезпечує високий рівень надійності утримання. Крім того, відмічено, що геометрія та жорсткість мембрани, початковий і кінцевий тиск можуть впливати на ефективність захоплення. Пристрій може захоплювати об'єкти, значно більші за габарити самого пристрою, а його ефективність залежить від таких факторів, як форма та розмір цілі, механічні властивості поверхні й тиск повітря. Це ускладнює виведення універсального виразу для максимальної ваги об'єкта довільної форми, що можуть бути захоплені пристроєм. Наприклад: спрощена модель для осесиметричних об'єктів, максимальна сила утримання яких може бути оцінена, як

$$F_{\max} = (2\pi \int_0^H (f(z) dz * \mu + F_e) P_v),$$

де  $H$  — висота сегмента мембрани, що контактує з поверхнею об'єкта;  $F_e$  — сила обтискання;  $\mu$  — коефіцієнт тертя між поверхнею об'єкта та мембраною;  $P_v$  — тиск у порожнині пристрою.

Вплив ребер жорсткості: збільшують стійкість мембрани, їх можна врахувати через ефективну жорсткість:  $Deff = D + krib \cdot n$ , де  $krib$  — жорсткість одного ребра,  $n$  — кількість ребер. Загальне рівняння для деформації мембрани:

$$D\nabla^4 w(z) = P(z) - kw(z),$$

де  $D$  — жорсткість мембрани;  $w(z)$  — прогин мембрани;  $P(z)$  — розподілений тиск;  $k$  — коефіцієнт пружної основи (залежить від ребер жорсткості).

Динаміка процесу виражається рівнянням, що показує зміну тиску в часі  $P_v(t)$ :

$$\frac{dP_v}{dt} = \frac{Q}{V} - \alpha \frac{P_v - P_{ext}}{\tau},$$

де  $Q$  — потік повітря;  $V$  — об'єм порожнини;  $\alpha$  — коефіцієнт витоку;  $\tau$  — характерний час процесу.

**Висновки.** Результати дослідження показали, що запропонована конструкція біонічного пристрою захоплення забезпечує надійне захоплення й утримання об'єктів різних форм і матеріалів їх поверхонь завдяки адаптивним властивостям еластичної мембрани, рівномірного розподілу навантаження на стінки об'єкта. Встановлено, що раціональними параметрами пристрою захоплення є жорсткість мембрани в межах 15 HSA та кут нахилу стінок робочої камери, що становить близько  $4^\circ$ , раціональний діапазон розрідження при асистуванні вакуумом полягає у межах від  $-15$  до  $-25$  кПа. Середній коефіцієнт надійності утримання складає 92,6% для всього діапазону протестованих зразків. Розміри об'єкта захоплення або переріз частини його поверхні, що взаємодіє з біонічним пристроєм захоплення, повинні бути у межах від 92% до 116% середнього діаметра внутрішньої поверхні мембрани. Запропонована технологія ефективна для роботи з пакованими харчовими продуктами малої маси, зокрема пластиковими контейнерами, картонними упаковками, пляшками. Пристрій демонструє переваги у випадках, де важливі обережність захоплення, відсутність деформації упаковки та необхідність обслуговування широкого спектра форм без переналаштування. Водночас потенційним обмеженням конструкції є складність

забезпечення високоточного позиціонування захоплених об'єктів під час подальших операцій, зокрема при укладанні в транспортну тару. Для вирішення цього завдання може бути застосовано додаткове інтегрування з напрямними елементами, сенсорними системами або візуальним контролем положення об'єкта.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Sui, D. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping. *Soft Robotics*. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0106> (date of access: 04.12.2024).
2. Root, S. E. et al. (2021). Bio-inspired design of soft mechanisms using a toroidal hydrostat. *Cell Reports Physical Science*, 100572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100572> (date of access: 04.12.2024).
3. Chen, F. J. et al. (2014). Soft Actuator Mimicking Human Esophageal Peristalsis for a Swallowing Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(4), 1300—1308. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2013.2280119> (date of access: 04.12.2024).
4. Hawkes, E. W. et al. (2017). A soft robot that navigates its environment through growth. *Science Robotics*, 2(8), eaan3028. URL: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aan3028> (date of access: 04.12.2024).
5. Gao, G. et al. (2021). A Pneumatically Driven, Disposable, Soft Robotic Gripper Equipped with Multi-Stage, Retractable, Telescopic Fingers. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(3), 573—582. URL: <https://doi.org/10.1109/tmrb.2021.3097143>.
6. Gerez, L., Chang, C.-M., Liarokapis, M. (2020). A Hybrid, Encompassing, Three-Fingered Robotic Gripper Combining Pneumatic Telescopic Mechanisms and Rigid Claws. *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 4–6 November.
7. Ockelmann, K. W., Vahl, O. (1970). On the biology of the polychaete *Glycera alba*, especially its burrowing and feeding. *Ophelia*, 8(1), 275—294. URL: <https://doi.org/10.1080/00785326.1970.10429564>.
8. Orekhov, V., Yim, M., Hong, D. (2010). Mechanics of a Fluid Filled Everting Toroidal Robot for Propulsion and Going Through a Hole. *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 15—18 August. URL: <https://doi.org/10.1115/detc2010-29053>.
9. Li, H. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Robot Based on Compliant Guiding Structure. *Soft Robotics*, 7(4), 491—499. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0154>.
10. Zang, H. et al. (2020). Bionic torus as a self-adaptive soft grasper in robots. *Applied Physics Letters*, 116(2), 023701. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5128474>.
11. Zhu, Z. et al. (2023). "Bobbitt Worm" — Inspired Soft Adaptive Grasper with Self-Generated Triboelectric Force Sensor. *Advanced Sensor Research*. URL: <https://doi.org/10.1002/adrs.202300154>.
12. Nguyen, V. P. et al. (2023). Bioinspiration and Biomimetic Art in Robotic Grippers. *Micromachines*, 14(9), 1772. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14091772>.
13. Perez, N. G. B., Coad, M. M. (2022). Self-Propelled Soft Everting Toroidal Robot for Navigation and Climbing in Confined Spaces. *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Kyoto, Japan, 23—27 October. URL: <https://doi.org/10.1109/iros47612.2022.9981175>.
14. Sui, D. et al. (2020). A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping. *Soft Robotics*. URL: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0106>.
15. Wang, D. et al. (2021). A Pneumatic Novel Combined Soft Robotic Gripper with High Load Capacity and Large Grasping Range. *Actuators*, 11(1), 3. URL: <https://doi.org/10.3390/act11010003>.