

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
« магістр »
бакалавр, магістр

на тему: «Дослідження особливостей захоплюваного пристрою маніпулятора
для транспортування продукції сільськогосподарського виробництва»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП
спеціальності 133 Галузеве
машинобудування
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр» групи 4
Трубай Андрій Юрійович
Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: Скрипник В.О.
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Дудніков І.А.
Прізвище та ініціали рецензента

ВСТУП

Забезпечення здатності промислових роботів якісно виконувати завдання захоплення об'єктів, їх надійного утримання під час перенесення та точного базування на заданих позиціях вимагало створення великої кількості різноманітних захватних пристроїв. До захватним пристроїв роботів пред'являються безліч технічних вимог, до яких відносяться забезпечення можливості захоплення об'єктів з різними формами поверхонь при створенні технологічно необхідного зусилля, що утримує. При маніпулюванні деякими типами об'єктів пред'являються додаткові, часто дуже жорсткі вимоги до забезпечення збереження поверхонь, з якими відбувається взаємодія захватного пристрою. Для реалізації широкого спектру вимог, що пред'являються до захватних пристроїв, часом доводиться вдаватися до оснащення роботів змінними захватними пристроями. У літературі наведено безліч різних схемних та конструктивних рішень таких пристроїв [1].

Однак, на практиці зустрічаються завдання, в яких потрібна мінімальна контактна взаємодія між захватним пристроєм та об'єктом маніпулювання, наприклад, у пристроях, що використовуються в електронній промисловості, при виробництві пофарбованих виробів, у різних галузях промисловості, пов'язаних з перенесенням тонких плівок та крихких об'єктів. Переважна більшість відомих і широко застосовуваних захватних пристроїв мають обмежені можливості утримання об'єктів з мінімальною контактною взаємодією. Істотно великі можливості при вирішенні цього завдання дозволяє отримати використання принципу створення вакууму в робочій камері захватного пристрою, що розглядається в даній роботі, за допомогою вихрового перебігу газу. Захоплювальні пристрої, побудовані цьому принципі, досі проаналізовані лише рідкісних практичних застосуваннях. Одними з перших дослідників промислових струминних та вихрових захватних пристроїв можна вважати С.М.Аксенова, В.А. Головня та В.Я. Червонослобідцева. З часом потреба в подібних пристроях зросла у зв'язку з розвитком електронної промисловості та виробництва загалом. Не було проведено докладних досліджень, заснованих на використанні комп'ютерних моделей таких

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристроїв. Патентний пошук показав, більшість патентів пов'язані з вихровими генераторами вакууму, а чи з вихровими захватними пристроями. Відсутня та науково обгрунтована методика проектування вихрових захватних пристроїв [1, 2].

У зв'язку з цим тема дисертації, присвячена дослідженню вихрових вакуумних захватних пристроїв та розробці методики їх проектування, є актуальною.

Об'єктом дослідження є вихровий захватний пристрій як робочий орган промислового робота.

Предметом дослідження є несуча здатність та параметри вихрового вакуумного захватного пристрою, що визначаються аналітично з використанням спрощеної математичної моделі та за результатами розрахунку методом кінцевих елементів вихрових течій, що у камері струменями стиснутого газу.

Метою роботи є дослідження вихрових захватних пристроїв роботів та розробка науково обгрунтованої методики їх проектування.

Основні завдання дослідження:

- виконати аналітичний огляд технічних рішень вакуумних захоплюючих;
- пристроїв та принципів утримання об'єктів маніпулювання;
- проаналізувати процеси, що визначають характеристики вихровихзахватних пристроїв;
- запропонувати та обгрунтувати математичні газодинамічні моделі вихрового вакуумного захватного пристрою;
- виконати розрахункове дослідження динамічних процесів, що протікають у вихрових захватних пристроях, призначених для роботизаціїтехнологічних операцій;
- виявити якісні та кількісні співвідношення, що пов'язують утримуючу силу вихрового захватного пристрою з його геометричними характеристиками, тиском та витратою стисненого газу;
- проаналізувати якість та достовірність результатів розрахунку течій газу, формування прикордонних верств при математичному моделюванні методом кінцевих елементів серед ANSYS FLUENT залежно від параметрів розбиття моделі захватних пристроїв на кінцеві елементи;

- систематизувати завдання маніпулювання об'єктом за допомогою вихрових захватних пристроїв, що відрізняються тим, що позиціонування і утримання об'єкта має здійснюватися при мінімальній взаємодії з захватним пристроєм;

- розробити науково обґрунтовану інженерну методику розрахунку та проектування вихрових захватних пристроїв роботів із заданими кінцевим і параметрами;

- провести експериментальне дослідження макета вихрового захватного пристрої для верифікації результатів, отриманих у роботі аналітичним шляхом та звичайно-елементним моделюванням;

- розробити рекомендації щодо практичного використання вихрових захватних пристроїв.

Методи дослідження та засоби.

У дисертаційній роботі використано відомі методи математичного аналізу механіки твердих тіл та теорії газодинаміки. Під час виконання чисельних

Практична значимість та реалізація досліджень. Запропоновані рекомендації та методики проектування вихрових захватних пристроїв дозволяють розробникам визначити конструктивні параметри пристроїв, що забезпечують задану здатність, що несе.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Класифікація захватних пристроїв

У світовому парку промислових роботів велика частка допоміжних чи обслуговуючих маніпуляційних роботів, які виконують операції перенесення різних об'єктів (наприклад, у машинобудуванні – заготовок, деталей, складальних одиниць, готових виробів). Різноманітність форм об'єктів та вимог до захоплення та утримування під час перенесення часто потребує використання захватних пристроїв, побудованих на різних фізичних принципах [1, 2].

Відповідно до стандарту захватним пристроєм називається робочий орган маніпулятора промислового робота або підйомного механізму, який служить для захоплення та утримання предмета виробництва або оснастки (рис. 1.1). Незалежно від принципу дії захватних пристроїв до них пред'являються такі вимоги, як здатність захоплення із заданих відносних положень захватного пристрою та об'єкта, базування об'єкта в захопленому стані, забезпечення необхідної несучої здатності при дії на об'єкт маніпулювання сили тяжіння та сил інерції. Відповідно до ГОСТ 26063-84 захватні пристрої за принципом дії поділяються на такі основні типи: - механічні; - електромагнітні; - вакуумні; - інші [1, 2].

Рисунок 1.1 – Класифікація захватних пристроїв згідно

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До теперішнього часу різноманіття захватних пристроїв не укладається у цю класифікацію. Лише з великою натяжкою розглядаються у цій дисертації захватні пристрої можуть бути віднесені до групи вакуумних. Велика різноманітність захватних пристроїв обумовлена різноманітністю форм захоплюваних об'єктів та додаткових вимог до процесів захоплення та утримання об'єктів маніпулювання.

Об'єкти маніпулювання можуть перебувати у різних фізичних станах (рідкому, сипучому, твердому); бути крихкими чи пластичними; мати різну форму; бути нерухомими або рухомими (наприклад, переміщатися транспортером); мати різну орієнтацію у просторі та симетрію [2, 3].

Захоплювальні пристрої можна також класифікувати за принципом дії, за кількістю робочих позицій та послідовності їх роботи, за видом управління, за методом кріплення на ланці маніпуляційної системи, за схемами та способом базування та утримання предмета виробництва, за фізичним принципом створення сил взаємодії об'єкта з робочими елементами захватного пристрою, за рівнем та способами адаптації і т.д.

1.2 Вакуумні захватні пристрої

Вакуумними називають захватні пристрої, що утримують об'єкти за рахунок створення розрідження в камері, обмеженою з одного боку поверхнею об'єкта, що утримується. Вакуумні захватні пристрої, основними елементами якого є одна або кілька присосок, що безпосередньо контактують з об'єктами, мають безліч переваг у порівнянні з іншими типами захватних пристроїв. Вони можуть працювати з об'єктами будь-якого магнітного або немагнітного матеріалу. Маса присоски зазвичай порівняно невелика [4].

Підйомне зусилля у вакуумних захватних пристроях створюється рахунок розрідження в камері між присоскою і об'єктом. При цьому сила тяжіння об'єкта пропорційна площі контакту вакуумної камери присоски та об'єкта. Згідно з ГОСТ 26063-84, вакуумні захоплення можна розділити на пасивні та активні.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пасивними вакуумними захопленнями називаються пристрої, в яких розрідження повітря в зоні контакту з об'єктом створюється на етапі захоплення при притисканні пружного елемента та його деформування. Причому як пружний елемент може використовуватися еластичний корпус, мембрана або сильфон. Схеми пасивних вакуумних захватних пристроїв представлені рис. 1.2 [4, 5].

а) з еластичною вакуумною камерою; б) з поршневою вакуумною камерою.

Рисунок 1.2 – Пасивні вакуумні захватні пристрої

Присоска, показана на рис. 1.2 а, є еластичною вакуумною камерою, яка деформується при накладенні на об'єкт маніпулювання при її придушенні. При цьому повітря, що знаходиться між деталлю та корпусом присоски, витісняється через кільцевий зазор, який при знятті навантаження закривається рахунок еластичності спідниці вакуумної камери. У цих випадках утримання деталі здійснюється лише за рахунок вакууму, створеного при пружній деформації еластичного корпусу. Варіант конструкції (рис. 1.2 б) відрізняється від варіанта конструкції (рис. 1.2 а) тим, що повітря витісняється з-під еластичної спідниці присоски при ході поршня вниз, що дозволяє отримати повніше витіснення повітря з камери камери захоплення [5].

Пасивні вакуумні захоплення використовується в так званих вакуумних пінцетах, що широко застосовуються при виробництві напівпровідників, виробів електроніки та інших подібних областях маніпулювання безліччю дрібних деталей, що мають гладкі поверхні (рисунок 3). Конструкція включає еластичну присоску 1, поршневу камеру 2, повітря з якої 15 витісняється при переміщенні поршня 3, після

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чого поршень повертається у вихідне положення під дією пружини 4, створюючи цим розрідження, що й утримує об'єкт маніпулювання.

Рисунок 1.3 – Схема вакуумного пінцету

Для скорочення часу захоплення та надійності утримування застосовують різні замикаючі пристрої (зворотні клапани), як кулькові, так і мембранні. При застосуванні подібних пристроїв досягається гарантоване витіснення повітря з порожнини захоплення при подальшому збереженні розрідження, що дозволяє прикладати найменше зусилля для захоплення. У разі використання клапанів достатній менший об'єм камери [5, 6].

Пасивні вакуумні захоплення набули широкого застосування завдяки своїй простоті, оскільки не потрібні вакуумні насоси та розподільна апаратура. Але їх використання обмежене малим часом надійного утримування на вазі об'єкта, чутливістю до шорсткості поверхонь і невеликим розрядженням і, як наслідок, мають місце більш жорсткі обмеження по масі виробів, що переносяться. Активні вакуумні захоплення відрізняються від пасивних тим, що у вакуумній камері розрідження створюється примусово за допомогою, наприклад, вакуумного ежектора (рис. 1.4 а) або поршневого насоса (рис. 1.4 б).

Рисунок 1.4 – Схема для отримання розрідження ежектором (а) або поршневим насосом (б)

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ежектор працює відповідно до закону Бернуллі. У перерізі, що звужується, створюється потік з високою швидкістю і тому з низьким абсолютним тиском; в область зі зниженим тиском спрямовується повітря із вакуумної камери. Ежектор доцільно використовувати у захватних пристроях невеликої вантажопідйомності. Стабільність розрідження сильно залежить від властивостей стисненого повітря, що підводиться: його ступеня відчищення, від пульсацій тиску. При роботі ежектори вимагають великої витрати повітря і при роботі вони створюють суттєвий шум.

Крім того, для зменшення обсягу, що відкачується, рекомендується ставити ежектор якомога ближче до захватного пристрою, внаслідок цього з'являється додатковий трубопровід, що обмежує рухливість захватного пристрою.

Створення розрідження за допомогою вакуумного насоса усуває частину наведених вище недоліків. Насоси, що відкачують, дозволяють отримувати більш високе розрідження, що підвищує несучу здатність схватів. Але ціна форвакуумного насоса набагато вища, ніж ежектора. В особливо відповідальних місцях доводиться ставити два насоси, основний та аварійний; аварійний підключається у разі підвищення тиску у вакуумному ресивері. На рис. 1.5 наведено схеми варіантів активних захватних пристроїв [6].

Рисунок 1.5 – Активні вакуумні захватні пристрої

Варіант, представлений на рис. 1.5 а, має аналогічну пасивному захопленню еластичну камеру з отвором для відкачування повітря; подібна конструкція може

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути закріплена на шаровій опорі для можливості додаткової самоустановки на поверхні об'єкта маніпулювання. Варіант, представлений рисунку 5 б, є сильфонний захоплення. Подібна конструкція вакуумної камери за рахунок здатності стінок до деформації в широкому діапазоні дозволяє краю захоплення більш щільно прилягати до нерівних або похилих поверхонь.

Для захоплення тонких листових матеріалів застосовують вакуумні камери з центральними опорними (базуючими) елементами різної форми (рис. 1.6).

Рисунок 1.6 – Вакуумна камера захватного пристрою з додатковими опорними елементами у центральній частині

Рисунок 1.7 – Різні вакуумні захватні пристрої

Подібна форма вакуумної камери дозволяє уникнути деформації тонких пластин об'єктів усередину вакуумної камери. Це важлива перевага, оскільки деформування може призвести до розгерметизації вакуумної камери або псування об'єкта. Також вакуумні камери захватного пристрою можуть бути виготовлені різної форми, пристосованої під конкретні об'єкти. Різні варіанти базуючих елементів вакуумних камер представлені рис. 1.7 [6, 7].

Вакуумні захвати можуть бути забезпечені ущільненнями (деформованими або жорсткими профільними) для герметизації камери. Пасивні захвати повинні працювати в таких умовах, коли забезпечується і тривалий час зберігається хороша

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

герметичність камери, тоді як активні захватні пристрої можуть працювати навіть при значних протіканнях. В останньому випадку необхідне постійне відкачування повітря з робочого простору між об'єктом та робочою камерою.

При роботі з виробами з низькою чистотою поверхні $R_z > 40$ потрібні додаткові м'які ущільнення, що допускають великі відносні деформації. При цьому у подібних ущільнень зазвичай низький термін служби, а точне базування деталей стає неможливим. Якщо ж шорсткість перевищує значення $R_z = 320$, то хорошої герметичності вакуумної камери, як правило, досягти не вдається. Крім того, як зазначалося вище, розглянуті вище вакуумні захватні пристрої чутливі до забруднення поверхонь.

У нестандартних завданнях маніпулювання потрібні спеціальні прийоми. Так, при захопленні перфорованих листів або листів з декількома технологічними отворами використовуються спеціальні конструкції вакуумних камер (рис. 1.8).

Рисунок 1.8 – Вакуумне захоплення для перфорованих деталей

Спочатку вакуумна камера захоплення 1 підноситься до об'єкта 2, при замиканні робочого об'єму тиск у камері починає знижуватися, і при цьому починає зростати потік повітря через отвори в деталі, що знаходяться безпосередньо під робочою камерою захвату. При цьому швидкісний напір у зазорі між рухомою пластиною 3 та об'єктом теж зростає. Тоді пластина 3 підвішена на пружинних опорах 4 прилипає до об'єкта, забезпечуючи повне замикання вакуумної камери.

Однак при цьому знижується здатність, що несе, через те, що під пластиною розрідження відсутня. Подібне рішення дозволяє знизити навантаження на вакуумний насос, що благотворно позначається на ресурсі його роботи та споживанні енергії. На зниження втрат також спрямовані спеціальні конструктивні

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рішення з використанням додаткових пристроїв, що замикають. Схема однієї з подібних конструкцій представлена на рис. 1.9. Утримання об'єкта 1 здійснюється за рахунок декількох ідентичних присосок 2, що містять у своїй конструкції замикання 3 у вигляді кульок У тих присосках, прилягання яких до поверхні об'єкта не забезпечено, кульки під впливом потоку повітря піднімаються вгору і замикають канали відведення повітря [6, 7].

Рисунок 1.9 – Вакуумний захватний пристрій для предметів виробництва зі складною поверхнею

Тим самим присоски, які б працювали неефективно в зонах поганого прилягання, відключаються від вакуумного насоса. До недоліків такої конструкції можна віднести мінливість підйомного зусилля та залежність від особливостей форми об'єкта маніпулювання.

1.4 Струменеві захватні пристрої

Існує особливий вид вакуумних захватних пристроїв - так звані струменеві захватні пристрої. Принцип дії таких захватних пристроїв заснований на різних аеродинамічних ефектах, зокрема ежекційний ефект, ефект Бернуллі або вихровий ефект, що дозволяють отримувати розрідження у вакуумній камері.

На рис. 1.10 показана схема найпростішого струминного захоплення, який складається з корпусу 1, тіло якого вмонтовано сопло 2, підключене до мережі стисненого повітря. Каналів подачі повітря може бути декілька.

На якісному рівні може бути таке пояснення принципу дії. При подачі повітря через сопло повітря 2 починає розтікатися між площиною корпусу 1 і плоскою поверхнею предмета виробництва. При цьому, оскільки сума абсолютного тиску та

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкісного натиску залишається незмінною, то при зростанні швидкісного натиску абсолютний тиск зменшується, забезпечуючи необхідне розрідження.

Рисунок 1.10 – Струменеві вакуумне захоплення

При зменшенні зазору між об'єктом і корпусом захоплення до деякого критичного значення (для розглянутих далі конструкцій 0,25-0,5 мм) швидко зростає зусилля, що відштовхують, з боку тиску подається через сопло. У 22 в результаті об'єкт утримується безконтактно через повітряну подушку. При цьому для центрування виробу може застосовуватися кожух, що фіксує, встановлений на корпус 1 (рис. 1.10) або додаткові стопора 2 (рис. 1.11) [4].

Стопора являють собою виступи на робочій поверхні захватного пристрою, при захопленні об'єктом її поверхня базується на цих стопорах. У цьому місця контакту стопорів з об'єктом визначено конструкцією, а площа зіткнення постійна.

Рисунок 1.11 – Способи фіксування заготівлі

Кожух 1 охоплює деталь по контуру, при цьому повітряний прошарок існує майже по всьому периметру кожуха. Контакт об'єкта із захватним пристроєм або відсутній, або мінімальний.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Пристрої та апарати, що працюють на основі вихрового ефекту

1.4.1 Вихрові апарати та пристрої

Найбільший внесок у розвиток теорії, методів розрахунку та конструювання вихрових апаратів зробив А.П. Меркулов. Роботи керованої ним з 1958 р. проблемної лабораторії забезпечили радянській науковій школі лідируючу позицію в галузі дослідження вихрових ефектів. Ці роботи сприяли формуванню сучасного розуміння вихрового ефекту, успішному початку промислового застосування вихрових апаратів. Використання вихрового ефекту надає нові якості технологічним системам, такі як швидкодія, мобільність, компактність, гранична простота при виготовленні та експлуатації. Саме це визначило широку сферу застосування вихрових апаратів [4].

Рисунок 1.12 – Вихровий холодильно-нагрівальний апарат

Вихровий холодильно-нагрівальний апарат (рис. 1.12) є досить простим апаратом без рухливих частин.

Стиснутий газ тангенціально підводиться в камеру поділу 1 (рис. 1.12) через сопловий апарат 2. З камери поділу охолоджений потік впливає через отвір діафрагми 3, а нагрітий потік – через дросель, утворений торцем камери і конусом 4. Змінюючи положення конуса, прохідного перерізу, тим самим змінювати витрату нагрітого, а отже, і охолодженого потоків. До основних геометричних характеристик вихрової труби можна віднести діаметр D_0 камери поділу в

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сопловому перерізі, довжина L камери поділу, діаметр D_x отвори діафрагми та кут конусності α камери поділу. Утворення охолодженого і нагрітого потоків є результатом перерозподілу енергії потоку стиснутого газу, що входить у вихрову трубу [8].

Застосування вихрових труб обумовлюється рядом особливостей робочого процесу та конструкцій апаратів:

1) У вихровій трубі можливе здійснення декількох процесів одночасно, таких як охолодження і нагрівання газу, очищення холодного газу. Реалізація двох процесів в одному апараті дозволяє створювати установки простіше, ніж використання двох і більш громіздких та складних пристроїв.

2) Робочим тілом вихрової труби може бути практично будь-який газ або суміш газів або багатофазні суміші. Тиск, що підводиться до труби, може змінюватись від одного кПа до десятків мПа, а витрати від часток – до сотень тисяч кубічних метрів на годину. Вихрові труби мають відносно невеликі габарити і масу, вони мають високу надійність і прості в обслуговуванні. Також до переваг вихрових труб можна віднести економічність установки (короткий пусковий період, низька вартість виготовлення).

Рисунок 1.13 – Вихровий ежектор

Стиснутий газ через соплове введення 2 надходить в камеру 1, де утворюється потік, що обертається з приосевої областю зниженого тиску. У цю область через

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

осьову трубку 3 надходить газ, що ежектується. Суміш, що утворюється, надходить у дифузор з равником 4, де він гальмується з підвищенням тиску. На стінці дифузора розташований регулюючий клапан. Найменший залишковий тиск, досягнутий подібними ежекторами становить 0,001 МПа в об'ємі 0,04 м³. У цьому ежектор мав такі визначальні розміри: $D_0 = 0,05$ м, $D = 0,025$ м, $L = 0,075$ м, $l = 0,038$ м [8].

Крім описаних вище пристроїв, вихровий ефект лежить в основі апаратів фазового та компонентного поділу, вихрових карбюраторів, вихрових гігрометрів. Безпосередньо вихрові труби знайшли своє застосування в різних галузях промисловості, таких як обробка металів різанням (охолодження різців при точінні), різноманітних переносних кондиціонерах та компактних охолоджувачах.

1.4.2 Вихрові захватні пристрої

Відповідно до теми дисертації у роботі розглядаються захватні пристрої з вихровим способом створення розрідження. Принцип їх дії заснований на ефекті, що виникає вихрових течіях. У центральній частині вихору існує область із тиском нижче атмосферного. Вихрові захватні пристрої мають ряд переваг [9]:

- простота конструкції та висока надійність (довговічність та безвідмовність);
- відсутність додаткових вакуумних генераторів;
- висока швидкодія;
- можливість захоплення об'єктів без точної орієнтації та без безпосереднього контакту із предметом;
- малі габарити та малі маси;
- нечутливість до забруднення поверхні об'єкта, можливість захоплення предметів із значною шорсткістю поверхні.

На рис. 1.14 представлена схема захватного пристрою з пневматичним струминним вихроутворювачем в замкнутій вихровій камері. У даній конструкції немає рухливих механічних деталей, вихор безпосередньо не контактує з об'єктом 5, а служить засобом отримання розрідження у центральній осі.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.14 – Вихрове вакуумне захоплення

У корпус вакуумної камери 1 через тангенціально спрямовані сопла 3 подається від компресора стиснутий газ через штуцер 4. При цьому у вакуумній камері 2 утворюється вихрове протягом з пониженим тиском у осі. Надлишок стисненого повітря виходить з бічних отворів 6 у нижній частині корпусу. Вакуум створюється у вторинній камері 5, що замикається поверхнею об'єкта. Це захоплення є вакуумним активним пристроєм з вбудованим генератором розрідження вихрового типу [9].

Рисунок 1.15 – Вихровий захватний пристрій з механічним вихованням

На рис. 1.15 представлена схема вихрового захватного пристрою з механічним виховання. У порожнині вакуумної камери 4 встановлена крильчатка 3, з'єднана з приводом 1, встановленим на корпусі 2. При розкручуванні крильчатки 3 у

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центральної частині вихрової камери утворюється область з пониженим тиском, що забезпечує утримання об'єкта 5.

У таблиці 1 наведено підсумкові результати порівняння за різними якісними показниками вакуумних контактних захватних пристроїв, з присосками та безконтактними вихровими захватними пристроями [9].

Таблиця 1.1 – Порівняльна оцінка вакуумних захватних пристроїв

Вакуумні контактні захватні пристрої	Вакуумні безконтактні вихрові захватні пристрої
Дозволяють захоплювати лише вироби з рівною гладкою поверхнею	Дозволяють захоплювати предмети з шорсткою і навіть нерівною поверхнею
Чутливі до забруднення поверхні	До забруднення поверхні не чутливі
Вимагають герметичних підводів вакууму. Потрібні дорогі пристрої, що створюють вакуум (генератори вакууму з очищенням повітря)	Як правило, системи працюють на стиснутому повітрі, і вакуум створюється самим захоплюючим пристроєм
Еластичні елементи схильні до зносу по зонах контакту	Контакт із предметом виробництва відсутня або він мінімальний. Як наслідок немає зносу робочих поверхонь

Аналогом вихрового вакуумного захватного пристрою якого роводиться в даній роботі, є вихрове захоплення циклонного типу, схема якого наведена рис. 1.16.

Рисунок 1.16 – Схема вихрового захоплення

Об'єкт 1 утримується рахунок розрядження, створюваного в камері захоплення 2. Захоплення забезпечує створення вихрового течії. Закручений перебіг створюється за допомогою сопел, що видувають газ тангенціально в кільцевий канал 3. При цьому надлишок газу йде через проміжок між деталлю і корпусом захоплення, забезпечуючи повітряну подушку між ними. В даному захватному пристрої вихор безпосередньо контактує з предметом виробництва на відміну від варіанта конструкції з вихровим ежектором (рис. 14), де вихор створює розрідження в самостійній, вторинній камері захватного пристрою. У 32 результаті стає можливим створення безконтактного захватного пристрою [9, 10].

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У плані конкретного використання вакуумних вихрових захватних пристроїв цікавими є кандидатська дисертація Р.М. Бакірова [9] та його публікації. Робота присвячена проведенню випробувань захоплення із напівобмеженою вихровою камерою. Також висвітлено питання інженерних розрахунків подібних пристроїв. У цій дисертації наведено результати експериментальних досліджень захватних пристроїв із напівобмеженою вакуумною камерою. Зокрема, досліджувався вплив висоти вакуумної камери, кількості каналів живлення (сопел) на утримуюче зусилля, а також вплив на зусилля форми вакуумної камери та умов виходу потоку в атмосферу.

За дослідженням впливу висоти вакуумної камери робиться висновок, що найбільше підйомне зусилля мають захоплюючі пристрої з ставленням висоти до діаметра не більше 0,15-0,2 в іншому випадку при збільшенні висоти по відношенню до діаметра через несформованість суцільного вихрового потоку утримуюче зусилля значно знижується. За умови збереження витратних характеристик і варіювання числа каналів від 1 до 6 будь-якої значної зміни підйомного зусилля не відбувається. Крім того, цікавими є результати дослідження в частині, що стосується впливу на характеристики захоплення кута між дном вакуумної камери і утворює циліндричної частини. Зокрема, коли камера являє собою конус (рис. 1.17), розбіжний у бік деталі, що утримується з кутом при вершині до 98° (рис. 1.17 а) утримуюче зусилля зростає на 20 % відносно камери з цим же кутом, рівним 82° (рис. 1.17 б) [9, 10].

Рисунок 1.17 – Різні форми вакуумної камери захватного пристрою

Проте робота Р.М. Бакірова, виконана в 2006 році, є єдиною, в якій ідея використання розрідження, створюваного вихровим ефектом, у вакуумних схватах була доведена до конкретних інженерних рішень, причому для одного окремого випадку.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВИХРОВИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Якісна оцінка процесів, що протікають у вихрових захватних пристроях та їх характеристики

У роботизованих технологічних комплексах досить часто зустрічаються завдання, у яких необхідно забезпечити мінімальний контакт робочих органів з об'єктом впливу при їх перенесенні.

Вихрові захватні пристрої (ВЗП), в яких мінімізована контактна взаємодія з поверхнею об'єкта, що захоплюється, являють собою оптимальне рішення для маніпулювання, наприклад, з легко деформованими і крихкими об'єктами або об'єктами з особливо чистими поверхнями. У цій дисертації обґрунтовується та опрацьовується спосіб захоплення за допомогою ВЗП з дотриманням зазначених вимог.

Поєднання відштовхувального та притягуючого зусиль у газодинамічному потоці дозволяє створювати вакуумні пристрої, що утримують об'єкт маніпулювання безконтактно.

Розглянемо у спрощеній постановці завдань у статичного утримання об'єкта. Важливо, що в положенні статичної рівноваги величина зазору між плоским об'єктом маніпулювання і кромкою камери приймає різні значення. При зміні зазору змінюється сила впливу розрядження в камері на об'єкт. Виходячи з дослідно конструкторських міркувань, висунемо гіпотезу, що зазначена залежність осьової сили F від зазору z має такий вигляд, як показано на рис.2.1 (сила F вважається позитивною, якщо об'єкт притягується до захватного пристрою та негативною, якщо відштовхується) [9, 12].

Початкове негативне значення F^* (при $z=0$) відповідає силі відштовхування у замкненій камері, коли закінчення стисненого газу з камери через кільцевий зазор не відбувається (об'єкт герметично притиснутий до корпусу захватного пристрою). Тиск усередині камери дорівнює тиску в магістралі стисненого газу. З появою

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щілини (при $z > 0$) крізь неї починає витікати газ, що означає, що у камері сформувався вихор. Однак при дуже вузькій щілині середній тиск в камері залишається великим по відношенню до атмосферного. Очевидно, що близькі до нуля значення зазору z інтересу, з погляду утримання об'єкта, не представляють. При значенні $z = z_0$ тиск у камері стає таким, що розрідження у центрі вихору врівноважується надлишковим тиском з його периферії. Далі сила F стає притягує внаслідок того, що падає середній тиск у камері, розрідження стає глибшим, і область розрідження зростає (область з надлишкового тиску все одно залишається, але займає вузьке кільце на периферії). При $z = z_m$ досягається максимальне значення осьової сили F . Далі при подальшому збільшенні зазору z притягує сила F падає, оскільки у вільному просторі, що утворюється, вихор видаляється і все більшою мірою виявляється зруйнованим. Розрахунок саме цього падаючого ділянки вимагав би використання більш складних моделей руйнування вихору при великих зазорах; але саме це неактуально, оскільки утримання об'єкта на ділянці, що падає, практично неможливе внаслідок нестійкості режиму [9, 12].

Рисунок 2.1 – Залежність осьової сили, що діє об'єкт маніпулювання з боку захватного пристрою, від величини кільцевого зазору z

Наближення ліворуч до екстремального (максимального) значення сили тяжіння неприпустимо, оскільки при неконтрольованих змін сил, прикладених до об'єкта, зокрема, при переміщеннях внаслідок сил інерції відбудеться відрив об'єкта від захватного пристрою.

Зазначимо, що для значень сили F , менших за максимальне значення, теоретично виходять два значення зазору, причому меншому значенню (z_1)

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідає стійкий стан, а більшому значенню (z_2) – нестійке. Внаслідок цього практичний інтерес становить лише одну ділянку, на якій залежність $F(z) > 0$ і ця функція зростає. Параметри цієї залежності можуть визначатися експериментально (при цьому потрібно точно задавати переміщення, змінюючи величину зазору та вимірювати силу F).

Таким чином, можна вважати, що в захватному пристрої такого типу реалізується, по суті, пружне підвішування об'єкта. Однак видається, що коливальні властивості щодо стійкого положення рівноваги практично не будуть проявлятися через сильне аеродинамічного демпфування. Тим не менш, у певних технічних додатках можуть бути корисними також і властивості пружного підвішування, що амортизують.

Описуване і досліджуване ВЗП є корпусом вихрової камери 1 циліндричної форми (на рис. 2.1 зображена його половина). Вихрову камеру тангенціально через сопла 3, вбудовані в стінки корпусу камери, подається під тиском робочий газ [9, 12].

Рисунок 2.2 – Вакуумний вихровий безконтактний захватний пристрій

При цьому всередині камери виникає кільцева вихор b , c зниженим тиском в області, близької до осі камери, і радіальний потік під надлишковим тиском в кільцевому зазорі z_1 між захопленням і верхньою поверхнею об'єкта 2 [9].

На якісному рівні механіка створення притягуючого зусилля, утримує об'єкт, описується в такий спосіб. Струмінь повітря, що виходить із сопла, починає

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рухатися по криволінійній траєкторії вздовж стінки камери захватного пристрою. Сили в'язкого тертя змушують розкручуватися газ у камері, і після завершення перехідного процесу все повітряне середовище в камері буде обертатися аналогічно вільному циліндричному вихору, але з іншим законом зміни швидкостей. У першому наближенні вважатимуться, що розподіл швидкостей лінійно залежить від радіусу робочої камери.

При обертанні всього об'єму газу зовнішні шари притискаються до стінки вакуумної камери відцентровими силами. На всі циліндричні шари газу в камері діє розподілене радіальне відцентрове навантаження, що направляє частинки газу до периферії, а потім притискає їх до стінок камери. Внаслідок цього статичний тиск збільшується від осі симетрії камери до периферії в радіальному напрямку.

Таким чином, на частинки газу, що знаходяться в камері, діють дві протилежно спрямовані сили різної природи: відцентрова, в напрямку від осі камери, і сила, що виникає внаслідок дії тиску градієнта, які врівноважують один одного. До центру камери тиск зменшується і наближається до певного мінімального значення. При якісній оцінці ефекту можна казати, що з закрученому русі повітря у центрі камери виникає з розрідженням.

2.2 Математична модель вихорового вакуумного захватного пристрою робота для визначення його несучої здатності

При розрахунку та проектуванні захватного пристрою аналізованого типу в якості вихідних параметрів задаються розміри вакуумної камери і здатність пристрою, що несе маса, об'єктів маніпулювання і динамікою руху захоплюючого пристрою разом з об'єктом. Розгляд умов рівноваги всіх сил дозволяє визначити здатність вакуумного захватного пристрою, що несе.

Спочатку несуча здатність визначається за відсутності руху, коли на об'єкт, що захоплюється, з плоскою, горизонтально орієнтованою, поверхнею діють тільки сила тяжіння і підйомна сила захоплення. Це означає, що зазор стабілізується таким чином, щоб підйомна сила захвату дещо перевищувала силу тяжіння, що діє на

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єкт Необхідно, щоб за їх спільному дії об'єкт перебував у рівновазі; відповідна умова накладає обмеження, з одного боку, на маси об'єктів, що переносяться, а з іншого боку, на динамічні сили, що діють на об'єкти при переносі. Розподіл сил призводить до висновку, що виникає вигин захоплюваного об'єкта, і це може бути важливим для визначення умов міцності. Також для дуже тонких об'єктів у вигляді листів можуть бути суттєві деформації, зокрема складки, що призводять до значних змін зазорів [9].

По відношенню до сил тяжіння і сил інерції важливі також такі фактори, як зміщення центру мас і кутова орієнтація захватного пристрою.

Основні якісні міркування щодо положення рівноваги для даної механічної системи було викладено у п.2.1. Далі йдеться лише про стійке положення рівноваги об'єкта в захопленні. Причому це положення залежить як від механічних характеристик об'єкта (вага шорсткість поверхні і т.п.), так і від пневматичних характеристик захватного пристрою (робочий тиск газу, витрата тощо).

Теорія вакуумних вихрових захватних пристроїв заснована, з одного боку, на теорії вихрових рухів газу, яка розвивалася і вдосконалювалася протягом багатьох десятиліть, починаючи з класичної монографії А. Пуанкаре, потім Г. Гельмгольц, а з іншого боку, на теорії закінчення газу із сопла в обмежене середовище.

Рисунок 2.3 – Розподіл кутової швидкості обертової маси газу в сопловому перерізі вихрової труби діаметром 30 мм за відносним радіусом $r = r_1 / R$

Вихрові рухи газів у розглянутих завданнях завжди мають нестационарність, яка супроводжується значними пульсаціями тисків, режими перебігу газів є

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

турбулентними. Однак у спрощеній теорії розглядають лише постійні, стаціонарні складові швидкостей та тисків.

Згідно з результатами експериментальних досліджень вихрових труб вихровий ефект, який демонструє крива кутових швидкостей, побудована за експериментально отриманими значеннями тангенціальних швидкостей, має вигляд, представлений рис. 3.3. Значення тангенціальних швидкостей, віднесених до радіусу, вимірювалося з допомогою малих зондів [9].

Крива (рис. 2.3) показує, що в області від осі до певного радіусу потік обертається з практично постійною кутовою швидкістю $\omega \approx 19$ 1/с. Теоретично вихорів цю зону, що обертається з $\omega = \text{const}$, називають вимушеним вихором.

У периферійній області камери кутова швидкість різко знижується зі зростанням радіусу, а поблизу стінки у прикордонному шарі падає до нуля. Закон зміни швидкості у цій галузі, особливо у перерізах, близьких до сопловому, наближається до закону потенційного перебігу рідини. Теоретично вихрового ефекту цей перебіг прийнято називати вільним вихором.

Другою складовою задачею, що вирішується в ході досліджень, є завдання руйнування струменя, що виходить із сопла, яким закінчується канал подачі стисненого газу. Швидкість V закінчення із сопла для докритичного режиму, коли вона менша за швидкість звуку $V < V^*$, визначається виразом, а в закритому режимі швидкість залишається постійною та рівною швидкості звуку V^* .

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}. \quad (2.1)$$

Розглянемо використання як робочого газу стиснене повітря. При тиску магістралі стиснутого повітря $P = 0,5$ МПа витікання з трубопроводу діаметром 2 мм є критичним.

Після закінчення повітря камеру він розширюється з падінням тиску приблизно до атмосферного (від тиску 0,5 МПа до тиску 0,1 МПа, тобто в 5 разів). Якщо трубопровід безпосередньо входить у камеру, то розширення відбувається рівномірно на всі боки. Для отримання спрямованості розширення по дотичній до вихору використовують сопло. Сопло – це насадок, у якому потенційна енергія

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стиснутого газу перетворюється на кінетичну; вздовж осі сопла швидкість повітря, що рухається, збільшується до критичної, а тиск знижується. Абсолютний тиск зменшується у напрямку вихідного перерізу сопла, а швидкість може суттєво збільшуватися, що призводить до підвищення кутової швидкості обертання маси повітря в камері.

Завдання аеродинаміки процесів, що відбуваються у вихровому вакуумному захватному пристрої, досить складні. Математична модель цих процесів будується з урахуванням нелінійних диференціальних рівнянь у приватних похідних Нав'є-Стокса за певних граничних умов. Теорія аеродинаміки вихорів (переважно в необмеженому середовищі) займає значне місце у класичних монографіях з механіки рідин та газів. Теорія вихорів у циліндричних камерах також була розроблена, але переважно стосовно технологічних установок, призначених для очищення повітря з вилученням з нього твердих частинок та/або стосовно охолодження. Такі завдання, переважно, вирішуються чисельним методом кінцевих елементів. У розділі 3 описана серія чисельних комп'ютерних експериментів для складних тривимірних завдань аеродинаміки турбулентних течій, починаючи із закінчення газу із сопел і закінчуючи випуском газу з камери. В результаті математичного моделювання було визначено закони стаціонарного розподілу швидкостей та тисків у вихровій камері після виходу струменів із сопел.

Перш за все, необхідно мати зручну для практичного використання інженерну методику аналізу процесів та визначення параметрів на основі досить простих розрахункових формул.

Розрахунок розподілів швидкостей і тисків у циліндричній камері здійснюється при припущенні, що обертання значної частини об'єму газу відбувається навколо нерухомої вертикальної осі за відсутності обертального ковзання циліндричних шарів повітря один щодо одного, тобто. передбачається, що розподіл швидкостей такий самий, як у твердому тілі при його обертанні з кутовою швидкістю ω навколо нерухомої осі (рис. 2.4). При цій швидкості в усіх точках ортогональні радіусам, тобто. направлені по дотичних до концентричних кіл.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єм маси газу, що обертається з кутовою швидкістю ω в циліндричному об'ємі, обмежений циліндричною стінкою камери радіуса R . Очевидно, що при таких припущеннях сили тертя циліндричних шарів один про одного відсутні, і в значній частині об'єму камери вихрової не відбувається витрачання енергії. Можна припустити, що сили тертя і втрата енергії виникають лише у стінок у тонких прикордонних шарах, дослідження яких представляє самостійне завдання, вирішене у низці робіт [13].

Рисунок 2.4 – Розподіл тангенціальної швидкості газу в камері за радіусом
Товщина b прикордонного шару в турбулентному режимі (який характерний для захватного вихрового пристрою даного типу) грубо оцінюється за формулою

$$b = R \left(\frac{1}{\sqrt{Re}} \right), \quad (2.2)$$

де R – характерний розмір (можна вважати, що це радіус камери);

Re – число Рейнольдса, яке виражається співвідношенням.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot R}{\mu}, \quad (2.3)$$

де ρ – щільність повітря;

V – швидкість (середня) вихору;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості.

У цій роботі прикордонні шари, товщина яких, оцінена за наведеними вище формулами для типових параметрів камер, стосовно вакуумних вихрових захватним пристроїв, має порядок $0,1 \cdot R$, мала, і тому впливом прикордонних шарів на розподіл тисків (розрідження) і значення підйомного зусилля захватного пристрою для режиму, що встановився, можна знехтувати. Факт малості товщини прикордонного

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шару підтверджується результатами комп'ютерного моделювання під час використання методу кінцевих елементів. Також робиться припущення, що розподіл швидкостей та тисків не змінюється за висотою камери. Проте обов'язково необхідно враховувати стисливість газу, тобто. залежність щільності від тиску p , що змінюється по радіусу. Відповідно до прийнятої моделі тангенціальна швидкість $V(r)$ на радіусі r визначається виразом [13]

$$V(r) = \omega \cdot r = \frac{V_0 \cdot r}{R}, \quad (2.4)$$

де ω – кутова швидкість;

V_0 – лінійна швидкість біля стінки.

Значення $V_0 = V_\tau(R)$ тангенціальної швидкості повітря біля стінки камери, зрештою, визначається кінетичним моментом струменів повітря із сопел, тобто. добутком швидкості закінчення із сопел (у розглянутих задачах, це швидкість звуку $V_{кр}$, тобто близька до 360 м/с) на масову витрату. Однак перерахунок на швидкість V_0 утруднений; Тільки ясно, що з постійному витраті надходить стиснутого повітря через сопла, швидкість V_0 (майже – середня по висоті) тим менше, що більше висота камери.

Далі передбачається, що розподіл швидкостей у камері не залежить від координати z осі камери. Відповідно до цього приймається, що абсолютний тиск у газі $p(r)$ та його щільність $\rho(r)$ залежать тільки від радіусу r . Передбачається, що температура по всьому об'єму стала, тому процес є ізотермічним; тоді щільність пропорційна тиску.

Можна також припускати ізоентропічність процесу, тоді наведене вище співвідношення має бути змінено. У подальшому виведенні формул тиск $p(R)$ і щільність $\rho(R)$ у стінки вважаються відомими. Для виведення розподілу тиску радіусом розглянемо тонкий шар між двома циліндрами радіусів відповідно r і $(r+dr)$. При обертанні газу на кожен шар діє розподілене радіальне об'ємне навантаження $\rho \cdot \omega^2 \cdot r$ від відцентрових сил, внаслідок цього змінюється тиск і

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідно густина ρ . На позитивному збільшенні радіуса r відбувається позитивне збільшення тиску $dp(r)$

$$dp(r) = \rho(r) \cdot \omega^2 \cdot r \cdot d \cdot t. \quad (2.5)$$

Використовуючи співвідношення (5), що зв'язує тиск із щільністю, отримуємо замість 2.5

$$\frac{dp(r)}{p(r)} = \frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot r}{p(R)}. \quad (2.6)$$

Інтегруючи змінною r в межах від довільного значення r до межі $r=R$, отримуємо

$$\ln(r) = \frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot p(R)} + C, \quad (2.7)$$

де C – довільна стала.

Після її визначення з граничного, поки що передбачається заданим, умови $p(R)$ при $r=R$, отримуємо остаточно вираз для відносної зміни ступеня розрідження по радіусу r :

$$\frac{p(r)}{p(R)} = \exp\left[-\frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot (R^2 - r^2)}{2 \cdot p(R)}\right]. \quad (2.8)$$

Таким чином, формула зміни тиску по радіусу збігається з формулою розподілу гауса, центр якого зміщений щодо нуля ($r = 0$) до краю. У центрі на осі камери (тобто при $r = 0$) виходить мінімальне значення тиску:

$$\frac{p(0)}{p(R)} = \exp\left[-\frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot R^2}{2 \cdot p(R)}\right] = \exp\left[-\frac{\rho(R) \cdot V \cdot R^2}{2 \cdot p(R)}\right]. \quad (2.9)$$

Цим виразом визначається максимальне розрідження. Визначальним у виразі (2.10) є показник експоненти, що являє собою відношення швидкісного натиску біля стінки камери (при $r = R$) до статичного тиску також стінки:

$$F_e = 2 \cdot \pi \int_0^R (p(r) - p_0) \cdot r \cdot d \cdot r. \quad (2.10)$$

Результати розрахунків за формулами (2.8) та (2.10) представлені у вигляді графіків, що зображують залежності відношення показника розрідження в центрі від швидкості вихору біля стінки, наведені на рис. 2.5

Рисунок 2.5 – Залежність показника розрідження від швидкості біля стінки камери

Видно, що показник розрідження $p(0)/p(R)$ досягається при дуже великій швидкості $V^* \approx 300$ м/с, близької до звукової [9, 13].

При істотно менших дозвукових швидкостях замість (2.7) для розподілу ступеня розрідження доцільно обмежитися першими двома членами розкладання в статецьний ряд, тоді приблизно

$$\frac{p(r)}{p(R)} \approx 1 - \frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot (R^2 - r^2)}{2 \cdot p(R)}, \quad (2.11)$$

а в центрі, при $r=0$

$$\frac{p(r)}{p(R)} \approx 1 - \frac{\rho(R) \cdot V^2(R)}{2 \cdot p(R)}. \quad (2.12)$$

При використанні наближеного виразу (11) підйомне зусилля F_e можна знайти як інтеграл за площею:

$$F_e = 2 \cdot \pi \int_0^R (p(r) - p_0) \cdot r \cdot d \cdot r = 2 \cdot \pi \int_0^R \left[p(R) - \frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot (R^2 - r^2)}{2} - p_0 \right] \cdot r \cdot d \cdot r = -\frac{\pi}{4} \cdot R^4 \cdot \rho(R) \cdot \omega^2 + \pi \cdot R^2 \cdot p(R) = \pi \cdot R^2 \cdot p_0. \quad (2.13)$$

Якщо прийняти радіус камери $R = 0,025$ м, $\rho(R) = 1$ кг/м³ як щільність повітря за нормальних умов (атмосферний тиск), а тиск на периферії вихрової камери прийняти рівним $p(R) = 0,1$ МПа, то отримаємо значення підйомного зусилля: $F_e = 72$ Н.

Внаслідок чисельних розрахунків без зазначеного спрощення отримано уточнене значення сили F :

$$F_e = 2 \cdot \pi \int_0^R \left(\exp \left[-\frac{\rho(R) \cdot \omega^2 \cdot R^2}{2 \cdot p(R)} \right] \right) \cdot r \cdot d \cdot r = 58 \text{ Н.} \quad (2.14)$$

Таким чином, похибка обчислення за спрощеною формулою (2.13) порівняно з розрахунком інтеграла (2.14) чисельним методом (Рунге-Кутти) становить близько 20 %. Заради справедливості, варто зазначити, що якщо в розкладанні в степеневий ряд формули (2.9) зберегти три перші члени, вираз для сили набуде вигляду:

$$F_e = \pi \cdot \rho(R) \cdot R^2 - \pi \cdot p_0 \cdot R^2 - \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \omega^4 \cdot \rho(R)}{4} + \frac{\pi \cdot R^6 \cdot \omega^4 \cdot (\rho(R))^2}{24} = 56 \text{ Н}$$

У цьому випадку значення сили F дорівнюватиме 56 Н, а похибка обчислень складе 4 %.

Нижче наведено математичне моделювання аеродинаміки у вихровій камері. Результати проведених чисельних розрахунків методом кінцевих елементів розподілу тиску (зниження по відношенню до атмосферного) у робочій камері захватного пристрою представлені на рис. 2.6 графік 2.

На рис. 2.6 графік 1 представлені отриманий аналітично графі до розподілу тиску в робочій камері захватного пристрою.

На рис. 2.6 видно, що аналітичне рішення досить близьке до чисельного. Отримане аналітично наближене рішення дозволяє проводити спрощені експрес-розрахунки, що необхідно на початкових етапах проектування захватного пристрою типу, що розглядається. Для вирішення задачі параметричної оптимізації захватного

пристрою доцільно використовувати чисельне моделювання процесів, що відбуваються у вихровій камері вакуумного вихрового захватного пристрою.

Рисунок 2.6 – Графік зміни тиску по радіусу вихрової камери, розрахований аналітично – 1 та в системі ANSYS Fluent – 2

З результатів проведених розрахунків випливає, що рівень розрідження, яке вдалося досягти при розрахунках вихрової камери діаметром 50 мм, становить значення 0,04 МПа, а вихровий захватний пристрій діаметром камери 150 мм виявився здатним статично утримувати об'єкт масою 29 кг. Характеристики двох варіантів пристрою з різними діаметрами камер представлені таблиці 2.1 [9, 13].

Таблиця 2.1 – Характеристики вакуумних безконтактних вихрових захватних пристроїв

Показник	Значення	
Діаметр вакуумної камери, мм	50	150
Діаметр сопла, мм	2	3
Максимальна розрахункова маса вантажу, що утримується статично, кг	7,8	29
Витрата стиснутого газу, л/хв	210	622
Тиск, що підводиться, МПа	0,6	0,6
Швидкість вихору на периферії вакуумної камери, м/с	320	310

Отримані характеристики вакуумних приладів дозволяють використовувати ці захватні пристрої для вирішення багатьох практичних завдань, у тому числі завдань маніпулювання в роботизованих технологічних системах.

Наведені вище залежності (2.13-2.14) можуть бути використані при проектуванні ВЗП. Проектування вакуумної вихрової камери для захватного

пристрою передбачає обґрунтований вибір її геометричних параметрів та параметрів сопел, а також тиску стисненого повітря. Основними геометричними параметрами є: діаметр D , висота h камери, діаметр сопла та їх кількість, ширина борту корпусу вакуумної камери над кільцевим зазором між захватним пристроєм і об'єктом, що переноситься. Стиснене повітря може надходити від самостійного насоса або з центральної магістралі; у другому випадку потрібно враховувати, що реальний тиск може бути значно нижчим за стандартний для промисловості (наприклад 0,4 МПа).

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИХРОВИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРІЙ

3.1 Визначення параметрів вихроутворюючих сопел захватного пристрою

Вихор у вакуумній камері створюється за допомогою газового потоку, що виходить з чотирьох сопел, які встановлені таким чином, щоб напрям струменів стисненого газу проходило по дотичній до направляючої перерізу камери [14].

Щоб визначити, який початковий дозвіл задати для розбиття розрахункової моделі захоплення на елементи, розглянемо спочатку спрощену осесиметричну задачу для одного сопла, з якого стиснутий газ спливає у вільну атмосферу (необмежений простір). Це завдання розглядалося у великій кількості робіт.

Рисунок 3.1 – Звичайно-об'ємна модель взаємодії сопла з середовищем

Досліджувана спрощена геометрична модель (рис. 3.1) є тонким циліндром (сопло діаметром d ; для конкретного числового прикладу взято $d = 2$ мм), що примикає до області, яка повинна була б вважатися необмеженою, але задається у вигляді циліндра; тиск у ній достатньому видаленні передбачається атмосферним.

Конфігурація цієї розрахункової області з атмосферним тиском, до якої входить струмінь із сопла, значення не має, якщо вважати, що її розміри значні. Для спрощення розрахунків ця область представлена у вигляді співвісного циліндра, що значно перевершує діаметром ($10 d_{\text{сопла}}$) діаметр сопла. Вихідно сітка задається рівномірною в межах довжини ребра елемента сопла від 0,1 мм до 0,5 мм. Для

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементів вихідного обсягу встановимо ці параметри рівними 1мм та 0,5 мм відповідно.

Також уздовж стінки сопла був сформований шар елементів товщиною 0,15 мм з елементами у формі призм для коректного відображення специфіки прикордонного шару. У цьому прошарку швидко змінюються розрахункові параметри (тиску, швидкості). Тому доцільно ущільнити (згустити) сітку до меж розрахункової області. Також підвищення рівня коректності розрахунків використовуємо спеціальні пристінні функції, інформацію про які викладено.

На вході сопла (поверхня 1, рис. 3.2) встановимо граничну умову визначення повного тиску (pressure inlet). Вважатимемо його рівним 0,6 МПа. Це можливо, якщо перед соплом знаходиться ресивер із великим запасом стисненого газу при постійному тиску. У потоці, що входить в розрахункову область, задаємо повний тиск, що дорівнює сумі швидкісного напору і статичного тиску. На межах 2 вихідній області вважаємо статичне тиск (pressure outlet) рівним нулю, тобто. рівним атмосферному. Слід зазначити, що у ANSYS FLUENT вказується значення атмосферного тиску, з використанням якого виробляються всі розрахунки. Поверхні 2 обмежують досить велику розрахункову вихідну з атмосферним тиском [14].

;

Рисунок 3.2 – Двовимірне зображення допоміжного завдання витікання із сопла у велику область

Іншим поверхням 3 (це межі магістралі та поверхню, в яку вмонтовано сопло) привласним граничну умову твердої поверхні (wall). Для оцінки турбулентності була обрана модель до $k-\epsilon$, як модель, що найчастіше застосовується для інженерних розрахунків турбулентних течій [14].

Поруч із рівняннями Нав'є-Стокса під час використання до $k-\epsilon$ моделі записуються два додаткові рівняння для перенесення кінетичної енергії

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

турбулентності і транспорту дисипації турбулентності, що найчастіше використовується під час вирішення реальних інженерних завдань із великими числами Рейнольдса.

Число Рейнольдса, для розглянутої задачі закінчення газу із сопла має значення [15]:

$$Re = \frac{d_c \cdot v}{\nu} = \frac{0,002 \cdot 200}{1,3 \cdot 10^{-5}} \approx 30000, \quad (3.1)$$

де d_c – характерний розмір прохідного перерізу сопла (в аналізованому випадку – діаметр сопла);

v – швидкість потоку газу.

Як буде показано нижче, при перепаді тиску 0,5 МПа при використанні сопла діаметром 2 мм число Маха приблизно дорівнює 1,8. Для попередньої оцінки на основі наявного досвіду у першому наближенні швидкість потоку була обрана рівною 200 м/с. Параметр ν – кінематична в'язкість повітря при нормальних умовах було прийнято $\nu = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с. При вибраних значеннях $d_{сопл}$, v і ν число Рейнольдса значно більше критичного значення, але це означає, що режим течії газу глибоко турбулентний [15].

Основне завдання з розрахунку вихрової камери пов'язане з криволінійним рухом потоку, тому для розрахунків було обрано RNG версія $k-\epsilon$ моделі. Вона була запропонована Якхотом та Орзагом. Рівняння для характеристик турбулентності та виразу для вихрової в'язкості були взяті такими ж, як для стандартної $k-\epsilon$ моделі, проте модельна константа $C_{\epsilon 2}$ визначається як функція швидкості деформації.

Розрахунок ведеться для газу, що стискається, з параметрами щільності і в'язкості газу відповідним повітрям. Після проведення розрахунків для першого варіанта розбиття моделі на 70 тисяч елементів оцінили вплив щільності сітки на кінцеві результати. Після чого було проведено повторні розрахунки зі збільшенням числа кінцевих елементів. У другому варіанті розбиття кількість елементів було доведено до 100 тисяч. У третьому варіанті розбиття коефіцієнти масштабування сітки змінені так, що число елементів збільшилося приблизно в 2 рази, і дорівнювало

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

140 тисяч. Для всіх варіантів розрахунку проводилося 800 ітерацій обчислень. Час розрахунку другого варіанта розбиття склало 92 хв, розрахунковий час 800 ітерацій з третім варіантом розбиття моделі склало 117 хв.

Для якісного порівняння варіантів розбиття моделі були обрані такі характеристики, що використовуються як критерії порівняння:

1) Поле швидкостей області вихідного перерізу сопла.

У цій галузі швидкість потоку зазнає значних змін. Досвід чисельних розрахунків показує, що у подібних областях результати обчислень особливо чутливі до вирішення сітки.

2) Профіль зміни статичного тиску по осі сопла на всій його довжині від вхідного перерізу до вихідного перерізу.

На рис. 3.3 для візуально порівняння наведені поля статичного тиску вздовж осі сопла для першого та третього розбиття P_1 та P_3 відповідно.

Рисунок 3.3 – Поля статичного тиску для розбиття P_1 та P_3

Спочатку, відволікаючись від абсолютних значень тиску, зауважимо, що картина зміни тиску для першого розбиття значно відрізняється від тієї, яка виходить для третього розбиття з дрібнішим кроком. Зокрема, дозволу першого розбиття не вистачає, щоб відобразити зміни тиску в областях із тиском, що стрімко змінюється.

На рис. 3.4 укрупнено показана область, що знаходиться відразу за вихідним перерізом сопла. Дрібніше розбиття дозволило розрахувати точніше зміни

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів потоку. У першому розбиття просто немає області з тиском нижче атмосферного (на рис. 3.3 P_3 біла світла область, зображена укрупнено). На рис. 3.4 також представлені поля швидкостей для першого та третього розбиття P_1 та P_3 відповідно.

Рисунок 3.4 – Поля швидкостей для розбиття P_1 та P_3

З рис. 3.4 видно, що при збільшенні роздільної здатності сітки поля швидкостей стають змінними, що плавно змінюються. Збільшення числа кінцевих елементів дає коректніші межі полів швидкостей, тисків та інших розрахункових параметрів. Також видно, що швидкість потоку вздовж сопла коливається в межах 203-280 м/с. Спочатку на межі розрахункової області в розрахунках було задано швидкість потоку, що дорівнює 200 м/с. В результаті при розрахунку з використанням ANSYS було визначено рівноважну для цих умов швидкість потоку.

На рис. 3.5 представлені графіки зміни тиску по довжині сопла, побудовані по 100 точках для трьох розбиття P_1 , P_2 та P_3 . З графіків видно, що статичний тиск по довжині сопла від вхідного перерізу падає від граничного значення повного тиску 0,6 МПа (при швидкості потоку 200 м/с) до значення близько 0,15 МПа у вихідному перерізі.

За графіками, представленими рис. 3.6, наочно видно наскільки різняться розрахункові значення тисків зі збільшенням роздільної здатності сітки просторової моделі. На графіці зображені криві, що відображають різницю у відсотковому

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

співвідношенні між значеннями, отриманими при різних варіантах розбиття моделі на кінцеві елементи. Так різниця між варіантом розбиття 1 та 2 зображується кривою d_{1-2} .

Рисунок 3.5 – Графіки зміни статичного тиску p по осі сопла $x = 0$ – вхідний переріз $x=0,03$ м – вихідний переріз сопла (для варіантів розбиття на 70, 100 та 140 тис. елементів відповідно)

Рівні помилки при розрахунку статичного тиску не перевищують 5,2 % (рис.3.6) для варіантів розбиття 1 і 2. При порівнянні варіантів розбиття 2 і 3 відносна помилка визначення тиску в основному виходить менше 1%.

Рисунок 3.6 – Графіки відносних помилок обчислень при різних варіантах розбиття моделі

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Помилки зростають у областях з різко змінюваними значеннями параметрів, що розраховуються. Саме тому, у подібних областях зменшення помилки сітка штучно згущується.

На рис. 3.7 представлені профілі швидкостей діаметром у поперечному перерізі сопла для розбиття P_1 , P_2 та P_3 .

Рисунок 3.7 – Профіль швидкостей для розбиття P_1 , P_2 та P_3

Графіки (рис. 3.7) наочно ілюструють наявність у потоці тонкого пристінного шару прикордонного газу. Параметри руху в цьому шарі сильно відрізняються від руху потоку в ядрі перерізу. Оцінка товщини прикордонного шару наводилася формула [15]

$$h = l \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Re}} \right), \quad (3.2)$$

де l – характерний розмір (для цього завдання вважатимуться, що це діаметр сопла 2мм);

Re – число Рейнольдса. У разі товщина прикордонного шару має розмір менше одного мікрона.

Значення похибка розрахунку швидкості при порівнянні варіантів розбиття 1 та 2 не перевищує 2,3 % (рис. 3.8).

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При порівнянні варіантів 2 та 3 похибка в основному не перевищує 1,5 %. Значне збільшення похибок у пристінних областях пояснюється наявністю прикордонного шару із великими градієнтами швидкості. Для більш точного розрахунку профілю швидкості, роздільна здатність сітки в пристінних областях підвищується. При цьому на інтегральні значення швидкості та тиску згущення сітки дає підвищення точності не більше ніж 5 %. Але зі збільшенням кількості елементів неминуче зростає час обчислень.

Рисунок 3.8 – Похибка розрахунку профілю швидкості

Навіть для цієї задачі, по суті, що зводиться до плоскої задачі, зі збільшенням числа елементів у два рази, час теж збільшився вдвічі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення середніх похибок розрахунку тисків сіткової залежності

Варіант розбиття	Число кінцевих елементів	Час розрахунку 800 ітерацій, хв	Середня похибка щодо попереднього варіанта розбиття розрахункового тиску, %
I	70 000	65	-
II	100 000	92	5,2
III	140 000	117	1

За результатами даного дослідження можна зробити висновок, що максимальне значення похибки, пов'язаної з розбиттям моделі на кінцеві елементи, не перевищує 5,5 %, що цілком припустимо для інженерних завдань даного класу.

Досліджена автором і коротко описана нижче модель є складнішою. Течії повітря, досліджувані у цій задачі, розглядаються, як тривимірні. Це, безумовно, позначиться на сітковій залежності, але й час при збільшенні числа елементів у 2 рази зростатиме вже майже в 3 рази (розрахунок моделі з 200000 елементів вимагає 2 год 12 хв, розрахунок моделі з 400000 елементів зажадав 6 год 09 хв). При цьому не можна забувати про обмеження, яке накладається обсягами оперативної пам'яті комп'ютера. Так, при об'ємі пам'яті менше 4 Гб неможливо проводити обчислення моделі з числом елементів більше 0,5 мільйона.

Визначення повної температури та витрати стисненого газу на граничних поверхнях вихрового захватного пристрою.

Для розрахунку витрати визначимо, чи потік робочого газу через сопло критичним або докритичним. Оцінимо показник перепаду тисків, що дорівнює відношенню тиску на виході сопла до тиску на вході. Отримуємо

$$\varepsilon = \frac{0,1 \text{ МПа}}{0,7 \text{ МПа}} = 0,14 < 0,528.$$

Для розв'язуваної задачі цей показник менше критичного значення 0,528. Це означає, що режим закінчення надзвукового. У цьому випадку об'ємна витрата газу розраховується за такою формулою:

$$G = 0,38 \cdot f \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T_0}}, \quad (3.3)$$

де f – площа поперечного перерізу;

P_0 – тиск на вході;

T_0 – абсолютна температура на вході.

При цьому ця об'ємна витрата залишається незмінною незалежно від зміни перепаду тисків, доки показник ε не перевищить критичне значення.

Для розрахунку повної температури були використані такі формули:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (3.4)$$

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-1}, \quad (3.5)$$

де P_0 – тиск на вході сопла, $P_0 = 0,6$ МПа;

p – тиск на виході, $p = 0,10,1$ МПа;

k – показник адиабати, для повітря до $\kappa = 1,4$;

M – число Маха;

T_0 – повна температура на вході сопла;

T – температура на виході, $T = 293^\circ \text{ К}$.

Звідси, з першої, з наведених вище, формули число Маха:

$$M = \sqrt{\left(\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \cdot \frac{2}{k-1}} = \sqrt{\left(\left(\frac{6}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) \cdot \frac{2}{1,4-1}} = 1,828. \quad (3.6)$$

В результаті повна температура:

$$T = T \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-1} = 293 \cdot \left(1 + \frac{1,4-1}{2} \cdot 1,828^2 \right)^{-1} \approx 490 \text{ К}. \quad (3.7)$$

Таким чином, повна температура на вхідній граничній поверхні набуває значення 217° С .

На рис. 3.9 зображено векторне поле розподілу швидкостей потоків газу безпосередньо в соплі та в найближчому просторі після вихідного перерізу сопла. Перепад тиску, заданий на межах розрахункової 72 області (від вхідного перерізу сопла до вихідного) є критичним. Тому вихідний переріз сопла "замикається". Швидкість потоку робочого газу безпосередньо за вихідним зрізом сопла в області *A* перевищує швидкість звуку (швидкість має порядок 400 м/с). У цій галузі відбуваються різкі стрибки швидкості; в результаті тиск у цій галузі нижчий за атмосферний, що добре помітно на рис. 3.3.

В результаті при подальшому збільшенні перепаду тиску від входу до виходу сопла підвищення витрати не відбувається. Рис. 3.9 добре ілюструє, як газ із зовнішнього середовища за рахунок в'язкого тертя захоплюється струменем, що виходить далі, у напрямку струменя. Швидкісний напір струменя вищий, ніж у

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навколишнього газу. В результаті статичний тиск в області течії вихідного потоку нижче, ніж в навколишньому просторі. В результаті статичний тиск в області течії вихідного потоку нижче, ніж в навколишньому просторі. Внаслідок цього, рух мас газу в навколишньому просторі потік спрямовано до осі симетрії сопла [16].

Рисунок 3.9 – Область високих швидкостей поблизу вихідного перерізу сопла

Вирішення описаної раніше допоміжної задачі дозволяє визначити витратні характеристики. Отримані значення доцільно порівняти з теоретичними значеннями. Як показано в, для повітря можна користуватися такими наближеними формулами закінчення для розрахунку масової витрати:

$$G = 0,76 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{(P_0 - P) \cdot P}{T_0}}, \quad (3.8)$$

де f – площа поперечного перерізу;

P_0 – тиск на вході;

T_0 - абсолютна температура на вході;

P – тиск на виході. При $P_0 \gg P$ використовується друга формула.

Тоді масова витрата за цими формулами

$$G = 0,38 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{6,08 \cdot 10^5}{\sqrt{293}} \cdot \frac{1}{9,8} = 0,00433 \text{ кг/с.}$$

Значення, розраховане кінцево-об'ємним методом, дає таке значення:

$$G = 0,00437 \text{ кг/с.}$$

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розраховане за аналітичними залежностями значення збігається зі значенням, розрахованим методом кінцевих елементів, з точністю до 1 %, що дозволяє зробити висновок про коректність отриманих результатів чисельного експерименту [16].

Витратна потужність, розрахована за такою формулою:

$$N = \frac{1}{2} \cdot G \cdot v^2 = 197 \text{ Вт.} \quad (3.9)$$

На рис. 3.9 так само легко помітити, що в пристінні області в соплі існує тонкий прикордонний шар з нижчими швидкостями, ніж швидкість потоку в ядрі перерізу.

3.2 Визначення параметрів прикордонного шару у робочій камері вихрового захватного пристрою

У розв'язуваній задачі ефекти, що виникають у пристінних областях, надають певний вплив на результати розрахунку. Тому стосовно завдання розрахунку газодинаміки у вихровій камері вакуумного захоплення необхідно використовувати сітку з роздільною здатністю, що забезпечує розрахунок прикордонного шару. У пристінних областях сила в'язкого тертя вихору про поверхню, з якою він стикається, значно більша, ніж у його тілі. У пристінному шарі радіальні швидкості v газу вищі, ніж у іншому тілі вихору (рис. 3.10) [9].

Рисунок 3.10 – Обертальний рух робочого тіла над нерухомим основою

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В результаті формуються спрямовані радіально всередину диска вторинні течії у потоці газу. Вторинними називають течії, в яких виключена дотична складова швидкості. Внаслідок цього поблизу нижньої межі окружна швидкість через сили тертя зменшується.

Так у задачі Бедевадта основна складова швидкостей частинок спрямована тангенційно до кільцевого вихора. Вторинний перебіг газу у вихровій течії на правління радіально до осі вихору. Тому, крім того, що частинки газу вздовж нерухомої поверхні рухаються коло, вони ще й повільно переміщуються до осі вихору. Щоб розрахувати вторинні течії необхідно розрахувати прикордонний шар.

Для цього при виконанні комп'ютерних розрахунків була ущільнена (згущена) сітка кінцевих елементів в пристінних областях. Причому, так як градієнт швидкості спрямований по відношенню до нерухомої поверхні по нормалі, то для коректного створення моделі прикордонного шару кінцеві елементи в пристінних областях створюються не вигляді тетраєдрів, а у вигляді призм, що йдуть шарами з трикутною основою [9].

Товщину першого шару осередків можна розрахувати на прикладі задачі одиночним соплом. В області, в якій потік із сопла втікає у вакуумну камеру захватного пристрою, швидкість буде аналогічна швидкості на виході із сопла, тобто. порядку $v = 230$ м/с. Для того, щоб за допомогою програми ANSYS було коректно проаналізовано процеси, що відбуваються в прикордонному шарі, задано величину Y^+ порядку одиниці [9]. Координата центру першого осередку розраховується за такою формулою:

$$Y = \frac{Y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot u_\tau}, \quad (3.10)$$

де μ – динамічна в'язкість;

ρ – щільність;

u_τ – динамічна швидкість.

Динамічна швидкість розраховується так:

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (3.11)$$

де τ_w – дотичні напруження, що виникають у пристінних областях.

$$\tau_w = \frac{\rho \cdot C_f \cdot v^2}{2}, \quad (3.11)$$

де C_f – мінімальне значення коефіцієнта тертя.

Тоді отримуємо

$$Y = \frac{1 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}}{1,225 \cdot 7,2} \cong 2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Враховуючи, що щільність і швидкість камери по радіусу непостійні, приймаємо координату центру першого шару осередків, що дорівнює 0,005 мм [9, 16]. При створенні сітки на моделі вакуумного вихрового захоплення необхідно вздовж поверхонь, що обмежують вихрову камеру, побудувати прикордонний шар кількох шарів тетраєдрів. Товщина першого шару цих елементів становить 0,01 мм.

Досвід математичного моделювання показує, що при розв'язанні задачі з соплом рішення сходиться до правильного, навіть за значної відмінності граничних умов від істинних. Однак у подальших розрахунках коректність граничних умов сильно позначається збіжності всього розрахункового процесу.

3.3 Математична модель робочої камери вихрових захватних пристроїв

Даний розділ присвячений дослідженню залежностей розподілів тиску в осьовій ділянці вихрової камери та, пов'язаних з цим інших параметрів від діаметра D камери захоплення та діаметра сопел, через які підводиться стиснене повітря.

Зокрема, звернено особливу увагу на пошук оптимальних конструктивних і газодинамічних параметрів вихрового захватного пристрою з метою зниження витрати стисненого повітря при збереженні зусилля утримання об'єкта при різних геометричних параметрах камери. У цьому розділі досліджено вплив діаметра D вакуумної камери захватного пристрою створення розрідження в приосевой області.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вакуумна камера 1 захватного пристрою 2 має циліндричну форму із округленими кутами (рис. 3.11) [9].

Зазор z між об'єктом та захватним пристроєм теж вважаємо постійним і визначаємо його з умови статичної рівноваги об'єкта під дією аеродинамічних сил та сили тяжіння об'єкта. У ході розрахунку визначається розподіл швидкостей і тисків всередині вакуумної камери вихрового захватного пристрою і каналів, що підводять.

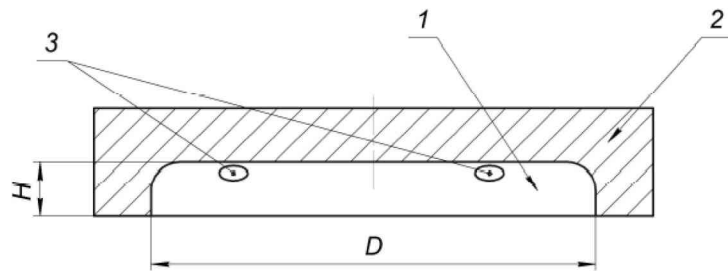


Рисунок 3.11 – Перетин вакуумної камери захвату по осі обертання вихору

На основі розв'язання задачі дослідження сіткової залежності вибрано параметри розбиття, аналогічні другому варіанту розбиття допоміжного завдання (на 100 тис. осередків) [17].

Рисунок 3.12 – Розбиття розрахункової моделі на елементи

Результати вирішення допоміжної задачі дозволяють зробити висновки про товщину прикордонного шару вздовж стінок камери та об'єкта, що утримується. Тому в розрахунковій моделі вихрової камери, для дозволу прикордонного шару у нерухомих поверхнях моделі побудований шар з призм висотою в 0,01 мм. Вигляд твердотільної моделі з накладеною сіткою кінцевих елементів представлений рис. 3.12.

3.4 Аналіз розподілів швидкостей та тисків газу всередині вихрового захватного пристрою

Потік робочого газу, що виходить з тангенціально спрямованих сопел, потрапляє в циліндричну вихрову камеру захватного пристрою, і починає рухатися вздовж циліндричної частини камери рис. 3.13 а, притискаючись до стінки відцентровими силами [17, 18].

а – картина потоків повітря в камері захвату, б – розподіл швидкості вздовж радіусу вакуумної камери (діаметр камери $D = 50$ мм, діаметром сопла $d = 2$ мм)

Рисунок 3.13 – Газові потоки у вакуумній камері

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Починає рухатися вздовж циліндричної частини камери рис. 3.13 а, притискаючись до стінки відцентровими силами. В результаті, на периферії камери утворюється високошвидкісне кільцеве протягом, яке внаслідок дії сил в'язкого тертя розкручує всю масу робочого газу вихровій камері. На рис. 3.13 б представлений графік розподілу тангенціальної швидкості газу за радіусом камери. На рис. 3.13 а видно, що у вихідному перерізі сопла також утворюється мала область з різким стрибком швидкості та розрідження, на рис. 3.13 а ця область забарвлена у червоний колір. Швидкість потоку у цій галузі досягає надзвукових значень, саме 470-500 м/с [17, 18].

Слід зазначити, що швидкість потоку в периферичному кільцевому шарі також нерівномірна. Графіки зміни швидкості по дузі діаметром $0,96 \cdot D$ представлені рис. 3.13 б.

Графіки побудовані вздовж ліній 1...4 (рис. 3.14 а), розташованих на радіусі $0,96 \cdot R$. Значення $0,96 \cdot D$ відповідає максимуму графіка розподілу швидкостей уздовж радіального перерізу (рис. 3.14 б).

Камери: а – рівні побудови графіків, б – графіки швидкості периферичного перебігу на діаметрі $0,96 \cdot D$

Рисунок 3.14 – Периферичні швидкості на різних рівнях у вихровій

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Графіки відповідають різним висот у вихровій вакуумній камері з діаметром $D = 50$ мм та діаметром сопла $d = 2$ мм. Середня швидкість зовнішньої кільцевої течії має рівень 390 м/с. Логічно припустити, що нерівномірність потоку біля зовнішньої межі камери пов'язана з положенням вхідного сопла та вхідним потоком. Струмінь, що виходить із сопла, починає рухатися по криволінійній траєкторії вздовж стінки камери захоплення. У свою чергу, сили в'язкого тертя змушують розкручуватись газ у камері, утворюючи вихровий рух газу всередині камери [18].

На всі частинки газу, що знаходиться в камері, починає діяти відцентрова сила, що призводить до зростання тиску в міру віддалення осі. В результаті, в приосьовій ділянці вихрової течії утворюється область з розрідженням. Графік зміни статичного тиску по радіусу представлений рис. 3.15 б.

а) у радіальному перерізі; б) за радіусом

Рисунок 3.15 – Поле та графік тисків усередині камери

На частинки газу в камері діють дві протилежно спрямовані сили різної природи: відцентрова, в напрямку від камери і осі від градієнта тисків. Графік тиску, побудований за радіусом вихрової камери, представлений на рис. 3.15 б. На вигляд поля тисків (рис. 3.15 а) можна зробити висновок, що розподіл тисків по висоті

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

камери змінюється несуттєво. Зокрема, безпосередньо на поверхні об'єкта, що утримується, розподіл тиску по радіусу має аналогічний вигляд [9, 18].

Крім того, по полю тисків (рис. 3.15 а) можна побачити, що тиск починає різко зростати в зазорі між об'єктом, що утримується, і стінкою вакуумної камери, і на виході зі щілини досягає атмосферного тиску. Варто відзначити, що зазор між об'єктом утримання та кромкою вакуумною камерою в розрахунковій моделі прийнято рівним 2 мм. Тому дане положення об'єкта утримання щодо кромки вакуумною камерою не є рівноважним. Якщо розглядати це положення в динаміці, то проміжок в даний (розрахунковий) момент повинен зменшуватися до рівноважного.

З графіка видно, що до центру камери тиск зменшується (збільшується розрідження) і наближається до свого мінімального значення. Було проведено серію чисельних експериментів. При цьому мета полягала в тому, щоб визначити тиск у центрі вакуумної камери, середній тиск та підйомну (утримуючу) силу залежно від діаметра камери при постійних значеннях інших параметрів моделі (постійний діаметр сопла, постійний зазор, постійний тиск на вході).

Результати розрахунків та подальшої обробки даних серії чисельних експериментів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати серії чисельних експериментів

№	Діаметр, м	Тиск у центрі камери, кПа	Середній тиск, кПа	Підйомна (утримуюча) сила, Н
1	0,050	-46,7	-39,6	78
2	0,055	-46,2	-40,0	95
3	0,060	-42,1	-36,1	102
4	0,065	-40,6	-35,0	116
5	0,070	-38,3	-33,2	128
6	0,075	-31,5	-26,2	116
7	0,100	-29,5	-26,4	208
8	0,150	-18,7	-17,1	302
9	0,200	-9,0	-7,1	222

Графіки змін тисків по радіусу представлені рис. 3.16. Для зручності порівняння графіків, радіус по осі абсцис відкладено у безрозмірному вигляді. На рисунку представлені графіки розрідження для варіантів розрахунку з однаковою витратою робочого газу (діаметр вхідних сопел 2 мм). Для всіх типорозмірів тиску

розраховувалися по лінії, аналогічній зображеній на рис. 3.15 а. Зі збільшенням діаметра вихрового захватного пристрою ядро вихору з розрідженням, близьким до розріджень в осьовий області, ставати більше. Так, для камери діаметром 200 мм рівень розрідження 0,0075 МПа зберігається аж до радіусу 70 мм, для камери з діаметром 50 мм рівень розрідження 0,047 МПа стабільний до радіусу 5 мм [9, 18].

Рисунок 3.16 – Графіки зміни тиску у вакуумній камері для різних діаметрів вакуумної камери щодо безрозмірного радіусу камери

Макимум розрідження досягається у центрі камери. Як очевидно зі зіставлення графіків (рис. 3.17), зі зростанням діаметра це розрідження зменшується. Це означає, що при великих діаметрах вакуумної камери потік газу із сопел недостатній для того, щоб розкрутити масу газу всередині камери.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.17 – Графік зміни середнього тиску в камері в залежності від діаметра вихрової камери при діаметрі сопла 2 мм

Численні експерименти проводилися для різних значень витрати стисненого газу. Отримані криві близькі на вигляд до лінійних, отже, зміна середнього тиску в певній області прямо пропорційно радіусу вакуумної камери.

3.5 Аналіз впливу параметрів робочої камери захватного пристрою на утримуючу зусилля

Як зазначалося раніше, на об'єкт, що утримується, з боку захватного пристрою одночасно діють дві протилежно спрямовані сили.

Цей ефект досягається за рахунок того, що над частиною поверхні об'єкта, що утримується, діє негативне (щодо атмосфери) поле тисків, а над іншою - позитивне. Причому область з негативним тиском зосереджена ближче до осі вихрової камери, а позитивна на периферії. Якщо розглядати статичну рівновагу (глава 2.2), то графік залежності підйомного зусилля F від зазору z , між об'єктом, що утримується, і корпусом захоплення, має вигляд, представлений на рис. 2.4 [9, 18].

На рис. 2.1 (глава 2.1) горизонтальним пунктиром показаний рівень сили F , що відповідає вазі об'єкта. Положення z відповідає положенню стійкої рівноваги, z_2 – нестійкого. Перевищення максимуму показує запас стійкості (за силою). Варто зазначити, що найменше перевищення максимального підйомного зусилля призводить до зриву об'єкта утримання. Точка z_2 визначає відстань, з якої захватний пристрій притягує об'єкт і відриває його від опори на початку захоплення. Розрахована чисельно залежність утримуючої сили захватного пристрою при зміні діаметра D (при постійному значенні діаметра сопла та постійному зазорі) змінюватиметься відповідно до графіка, представленого на рис. 3.18.

Рисунок 3.18 – Зміна утримуючого зусилля залежно від різних діаметрів вакуумної камери

Утримуюче зусилля прямо пропорційно площі, тобто радіусу камери в квадраті і тиску, який пропорційно радіусу (рис. 3.17). Отже, зусилля, що утримує, пропорційно радіусу в кубі. Важливо, що графік утримує зусилля є явно виражений максимум. Щоб отримати проміжні значення утримуючого зусилля для різних діаметрів вакуумної камери, можна провести апроксимацію результатів чисельного експерименту. В результаті апроксимації отриманий наступний поліном,

$$F(D) = 54,52 + 1,492 \cdot D + 0,0492 \cdot D^2 - 0,000188 \cdot D^3,$$

де F – утримуюче зусилля Н;

D – діаметр вакуумної камери в мм.

Рисунок 3.19 – Апроксимація експериментальних даних поліномом третього ступеня

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.19 точками показані дані, отримані внаслідок проведення чисельного експерименту. Таким чином, для опису залежності досить використовувати поліном третього ступеня. Також для порівняння на графіці наведена точка А (60,79), що відповідає отриманим експериментально даним.

3.6 Аналіз вторинних течій у камері захватного пристрою та їх впливу забезпечення утримання об'єкта маніпулювання

У газодинамічній задачі, що розглядається, на додаток до кругового руху частинок газу треба враховувати вторинні течії. По-перше, потрібно враховувати течії газу вертикальних площинах, що проходять через вісь камери. По-друге, для їх розрахунку необхідно ввести в газодинамічну модель, що розглядається, пристінні течії в прикордонному шарі. Відомі серйозні обчислювальні проблеми під час розрахунку прикордонних верств шляхом кінцевих елементів. У разі використання обчислювального програмного комплексу ANSYS FLUENT потрібно розбити обсяги на малі кінцеві елементи таким чином, щоб розрахунок прикордонного шару став можливим. Завдання прикордонного шару у вільному вихорі описане Бедевадтом Картина розподілу швидкостей газу була показана на рис. 3.20.

Як зазначалося раніше, рішення рівнянь прикордонного шару для суцільного середовища, що обертається над нерухомою основою, знайдено Бедевадтом [17, 18]. У камері захватного пристрою вихор сформований у всьому обсязі камери, але на тонкий (товщиною близько 0,01 мм) пристінний шар цей факт мало впливає. У пристінних шарах формуються вторинні течії, які суттєво впливають на картину та значення градієнта тиску та, як наслідок, підйомного зусилля. Стає можливим розрахувати прикордонний шар, якщо побудувати сітку кінцевих елементів зі значним штучним згущенням сітки елементів у пристінних областях. Загальний вигляд розрахованого чисельним експериментом векторного поля швидкостей вторинних течій представлено рис. 3.20.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.20 – Поле векторів швидкостей вторинних течій у радіальній перерізі камери захоплення

Як видно на рисунку, вторинні течії у радіальному перерізі біля кордонів спрямовані до осі камери, а в центральній частині – від осі. Графік радіальних швидкостей залежно від відносної висоти камері представлений рис. 3.21.

Рисунок 3.21 – Графік радіальних швидкостей вздовж висоти камери

Виразно видно різкі зміни швидкостей поблизу меж інтервалу. У прикордонному шарі великий вплив на сумарні сили, що діють на кожен виділений елементарний обсяг газу, вносить сила тертя стінки. Графік залежності коефіцієнта тертя від висоти камери представлений рис. 3.22.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.22 – Зміна коефіцієнта тертя залежно від безрозмірної висоти камери

Сили тертя здебільшого інтервалу дуже малі, але швидко зростають біля кордонів. Це означає, що біля стінок камери сили тертя значно більші, тоді як у центральній частині перерізу коефіцієнт тертя близький до нуля, відповідно і сили тертя малі.

В результаті формуються вторинні потоки газу, спрямовані до осі вихору поблизу поверхні деталі та верхньої стінки камери (рисунок 3.22). Товщина прикордонного шару в цьому завданні склала близько 5 % висоти і мала значення близько 250 мкм. Далі потрібно враховувати, що на кожний елементарний обсяг газу діють три сили: відцентрова, сила тертя та сила від дії градієнта тиску.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИХРЕВОГО ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЇ

4.1 Цілі та завдання експериментального дослідження

Метою експериментального дослідження була вибіркова перевірка дослідним шляхом основних результатів, отриманих вище.

У ході експерименту вирішувалися такі завдання:

- встановити експериментально вид залежності утримуючого зусилля від робочого зазору між камерою захватного пристрою і деталлю, що утримується, в якісному вигляді представленої в п. 2.1.;
- виміряти утримуюче зусилля при робочому зазорі 2 мм;
- порівняти отримані експериментально результати з теоретичними.

4.2 Визначення основних характеристик та зусилля в робочій зоні

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для проведення експериментального дослідження розроблено макет вакуумного вихрового захватного пристрою, представлений на рис. 4.1.

Рисунок 4.1 – Експериментальний зразок вихрового захватного пристрою

Так як практично виготовлення макета досить дороге, експерименти проводилися лише з одним варіантом макета. Звичайно, оцінити всі значення параметрів, знайдені в результаті чисельних розрахунків, Але, попри це, експериментальні дослідження дозволили вибірково оцінити отримані результати.

Рисунок 4.2 – Параметри вихрового захватного пристрою

Технічні характеристики досліджуваного вихрового захватного пристрою представлені у таблиці 4.1 та на рис.4.2.

Таблиця 4.1 – Конструктивні характеристики макета вакуумного вихрового захватного пристрою

Параметр	Значення
1. Габаритні розміри, мм:	
висота C	19
діаметр D_1	98
2. Розміри вихрової камери (внутрішні), мм:	

діаметр D	60
глибина h_1	5,5
3. Число сопел, шт.	4
4. Внутрішній діаметр сопла d , мм	1,5
5. Тиск стисненого повітря, що підводиться P , бар	5
6. Відстань від центру сопла до торця камери l , мм	4,75
7. Маса захватного пристрою, кг	0,2

В ході експериментального дослідження макета вихрового захватного пристрою визначалося утримуюче зусилля F , створюване таким пристроєм.

Як робочий газ в експерименті використовувався стиснене повітря, що надходило з пневматичної мережі з надлишковим тиском 0,5 МПа. Пневматична мережа забезпечувала витрату стисненого повітря явно більший, ніж потрібно роботи даного захватного устаткування. Для стабілізації витрати стисненого повітря, що надходить до досліджуваного макету, і мінімізації впливу характеристик трубопроводу, що підводить на результати експерименту, внутрішній діаметр перерізу трубопроводів, що підводиться, мав значення не менше 10мм. Також у пневмомережі для виключення "просідання" тиску був використаний ресивер об'ємом 200 л, а продуктивність компресора, що подає стиснене повітря до стенду, становила 0,24 м/хв.

Схема експериментального стенда представлена рис. 4.3.

Рисунок 4.3 – Схема експериментального стенду

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення вертикального переміщення був використаний фрезерний трикоординатний верстат (модель 676, виробництво КНР), з точністю переміщення випробуваної осі – 0,05 мм. Захватное пристрій закріплювалося в патрон, безпосередньо встановлений головці фрезерного верстата. На стіл фрезерного верстата було встановлено ваги (рис. 4.3).

Терези були попередньо навантажені вантажем масою 12,7 кг. Вантаж є сталеву заготовку з шорсткістю на робочій (верхній) поверхні не гірше, ніж Ra6,3. Зсув навантажуваної платформи ваг під дією зусилля, створюваного вихровим вакуумним завантажувальним пристроєм, призводить до зміни зазору між хватним пристроєм і вантажем.

Рисунок 4.4 – Схема оцінки зазору між торцем хватного пристрою та утримуваним вантажем

Для коректної оцінки зазору між торцем хватного пристрою та утримуваним вантажем за допомогою цифрового штангенциркуля (дискретність вимірювання – 0,01 мм) визначалася відстань між вантажем та верхньою площиною хватного пристрою (рис. 4.4).

Вимірювання проводилися в трьох точках, розміщених під кутом $\approx 120^\circ$ щодо осі хватного пристрою, а потім від середнього арифметичного значення одержаних результатів (значення B_1, B_2, B_3) забиралася товщина вакуумної камери C_1, C_2 і C_3 .

$$A_1 = B_1 - C_1, A_2 = B_2 - C_2, A_3 = B_3 - C_3,$$

$$A = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}.$$

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення A використовувалося як оцінка зазору між торцем захватного пристрою і вантажем, що утримується.

Вимірювання проводилися для різних кільцевих зазорів між робочою камерою та заготівлею. Діапазон вимірів від 0...50 мм. Спочатку зазор задавався шляхом переміщення столу верстата фрезерного вертикалі з відліком положення по лімбу. Після того, як зазор виставлявся, включалася подача стисненого повітря, знімалися значення показання ваг і оцінювався реальний зазор між торцем захватного пристрою і вантажем, що утримується.

Результати вимірювань наведено на графіку рис. 4.5.

Рисунок 4.5 – Графік зміни утримуючої сили в залежності від зазору між корпусом робочої камери та верхньою поверхнею заготовки

Отримана крива добре узгоджується з якісними висновками, наведеними у розділі 2.1. Порівняння результатів чисельного розрахунку, наведених у розділі 3.6, показали, що зусилля, що утримує, виміряне в ході експерименту, відрізняється від розрахункового приблизно 30 %. Ця похибка може бути пов'язана з безліччю факторів, а саме:

- група технологічних факторів, пов'язаних з неточностями та грубістю випробуваної моделі;

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- похибка ваг;
- нерівномірність зазору між робочою камерою та сталевною заготовкою;
- похибка вимірювання зазору за допомогою штангенциркуля.

На рис. 4.5 спільно з розрахунковими значеннями наведено значення, отримані експериментальним шляхом.

Численні експерименти проводилися для фіксованого зазору 2 мм. Було проведено серію порівняльних експериментів щодо визначення утримуючого зусилля при фіксованому зазорі 2 мм. Для чистоти експерименту вимірювання проводилися 25 разів, при цьому зазор 2 мм виставлявся щоразу заново. Результати отриманих утримуючих зусиль наведено у таблиці 12.

Таблиця 4.2 – Результати обробки серії експериментів визначення утримуючого зусилля при зазорі 2 мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	80,4	81,2	76,5	78,3	79,1	75,5	78,6	77,5	79,6	79,3
A, мм	2,03	2,01	1,97	2,06	1,98	1,97	2,04	1,99	2,02	2,01

№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
F, Н	81,4	82,3	80,1	80,7	79,4	80,6	77,8	77,7	79,6	79,7
A, мм	1,98	2,01	1,99	1,97	2,02	1,99	2,04	2,05	1,98	2,01

№	21	22	23	24	25	Сер.ар	σ	Макс. зн	Мін.зн.
F, Н	80,3	81,4	77,8	78,8	79,7	79,332	1,584	82,3	75,5
A, мм	2,00	1,99	1,96	2,00	2,03	2,004	0,0267	2,05	1,96

Вибіркові значення $(F_1, A_1), (F_2, A_2), \dots (F_{25}, A_{25})$ є реалізацією випадкової величини, що має двовимірний нормальний розподіл. Оскільки вимірювання проводилися незалежно, можна вважати, що кореляція між F_i і A_i дорівнює 0.

Тоді щільність ймовірностей для некартельованих величин має вигляд:

$$f(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_f \cdot \sigma_a} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(F - m_f)^2}{\sigma_f^2} + \frac{(A - m_a)^2}{\sigma_a^2} \right) \right],$$

де f – щільність ймовірностей,

σ_F – середньоквадратичне відхилення сили F ;

σ_A – середньоквадратичне відхилення величини кільцевого зазору

m_f / m_a – математичне очікування відповідної величини.

Розподіл щільності ймовірностей величин утримуючого зусилля та кільцевого зазору показує нормальний характер розподілу утримуючого зусилля.

Удосконалення конструкції та покращення технології виробництва вихрових вакуумних завантажувальних пристроїв дозволить підвищити їх вантажопідйомність та наблизити характеристики реальних захватних пристроїв до розрахункових значень.

Дані, отримані під час експериментальних досліджень, свідчать про їхню близькість до даних, отриманих під час чисельних експериментів. Також фізичний експеримент підтвердив працездатність спрощеної математичної моделі та висновків, зроблених виходячи з дослідно-конструкторських міркувань та аналізу вихрових процесів

Найпростіші варіанти конструктивних рішень додаткових пристроїв, що виключають зміщення об'єкта щодо захватного пристрою, а саме, неконтрольовані переміщення та обертання, зображені на малюнок 66.

1 – корпус захватного пристрою, 2 – фіксуючі елементи, 3 – об'єкт маніпулювання

Рисунок 4.6 – Різні варіанти фіксуючих елементів

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найпростіші варіанти конструктивних рішень додаткових пристроїв, що виключають зміщення об'єкта щодо захватного пристрою, а саме, неконтрольовані переміщення та обертання, зображені на малюнок 66.

У всіх, розглянутих на рис. 4.6, випадках передбачається фіксування та/або базування об'єкта за кромки так, щоб дотик до основної плоскої поверхні об'єкта був мінімальним, що є важливим для деяких технологічних процесів, наприклад, виробництва напівпровідників. Зазначені пристрої можуть бути пасивними, наприклад, у вигляді жорстких або пружних упорів (рис. 4.6) або активними (рис. 4.7) з самостійними механізмами та приводами. Природно, введення додаткових приводів входить у суперечність із простотою вихідної конструкції вакуумного захватного пристрою.

1 – привід активного базуючого пристрою, 2 – вихрове захватного пристрою,
3 – підведення/відведення стисненого газу

Рисунок 4.7 – Використання активного захватного пристрою для додаткового горизонтального базування об'єкта

Як зазначалося вище, ВЗП у робототехніці є прямими конкурентами вакуумних захватних пристроїв з ежекторами та присосками, що використовуються як робочі органи допоміжних (обслуговуючих) промислових роботів. Їх основне призначення – захоплення об'єктів їхнього наступного переміщення у просторі. Однак можливі інші області застосування вакуумних вихрових захватних пристроїв. Вони найкраще пристосовані для захоплення заготовок з листових матеріалів. В

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості найбільш важливих областей застосування слід відзначити завдання перенесення листового скла, коли захватний пристрій є комбінованим і має кілька присосок, розташованих так, щоб згинальні напруги в скляному листі знаходилися в допустимих межах.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Охорона праці

В Україні виникають щорічно тисячі важких надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, в наслідок яких гине велика кількість людей, а матеріальні збитки сягають кількох мільярдів гривень. Нині в багатьох областях України у зв'язку з небезпечними природними явищами, аваріями і катастрофами обстановка характеризується як дуже складна [19].

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях в умовах сільськогосподарського виробництва – важливе завдання, вирішення якого забезпечить нормальні умови праці працівниками сільського господарства. Це заходи по подальшому поліпшенню і оздоровленню умов праці, широкому впровадженню сучасних засобів безпеки, усуненню причин, що породжують травматизм, створенню на виробництві необхідних гігієнічних і санітарно-побутових умов.

Охорона праці в нашій країні охоплює заходи по подальшому полегшенні умов праці на основі механізації важких і шкідливих виробничих процесів, широкому впровадженню сучасних засобів охорони праці, усуненню причин, що породжують травматизм і професійні захворювання робітників. Вона тісно пов'язана з умовами праці [19].

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умови праці – характеризуються оціночними показниками мікроклімату, наявністю в робочій зоні шкідливих та небезпечних виробничих факторів, психофізичним та естетичними елементами діяльності працівників господарства.

Вантажно-розвантажувальні роботи із зерном, продуктами його переробки та тарними вантажами виконують механізованим способом за допомогою підйомно-транспортного устаткування та засобів малої механізації відповідно до вимог «Правил охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт», затверджених наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 січня 2015 року № 21, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 03 лютого 2015 року за № 124/26569 [20].

Основні вимоги при вантажно-розвантажувальних роботах: - місця де виконуються роботи розвантаження повинні бути облаштовані знаками безпеки; - після проведення вантажно-розвантажувальних робіт з мікродобавками, преміксами, комбікормами та комбікормовою сировиною працівники приймають душ та переодягаються у чистий одяг; - рух транспортних засобів у місцях ведення вантажно-розвантажувальних робіт здійснюється за транспортно-технологічною схемою з установленням відповідних дорожніх знаків, а також знаків, прийнятих на залізниці, водному та автомобільному транспорті; - накатування, підйом та встановлення транспортних механізмів здійснюються за допомогою лебідок або вручну по похилій площині з міцно приєднаними східцями, ширина проходу для працівників має бути не менше 0,75 м з кожного боку; - транспортер-вагонорозвантажувач, на якому встановлена крильчатка, повинен мати упор для унеможливлення самоперевертання [20].

5.2 Екологічна експертиза

Екологічна експертиза в Україні – вид науково-практичної діяльності спеціально уповноважених державних органів, еколого-експертних формувань та об'єднань громадян, що ґрунтується на міжгалузевому екологічному дослідженні, аналізі та оцінці перед проектних, проектних та інших матеріалів чи об'єктів,

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізація і дія яких може негативно впливати або впливає на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей, і спрямована на підготовку висновків про відповідність та планованої чи здійснюваної діяльності нормам і вимогам законодавства про охорону навколишнього середовища, раціональне використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки [21].

Відносини в галузі екологічної експертизи регулюються Законом України «Про екологічну експертизу» (9.02.95р.).

Завданням законодавства про екологічну експертизу є регулювання суспільних відносин в галузі екологічної експертизи для забезпечення екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, захисту екологічних прав та інтересів громадян і держави.

Метою екологічної експертизи є запобігання негативному впливу антропогенної діяльності на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей, а також оцінка ступеня екологічної безпеки господарської діяльності та екологічної ситуації на окремих територіях і об'єктах.

Основними завданнями екологічної експертизи є:

1) визначення ступеня екологічного ризику і безпеки запланованої чи здійснюваної діяльності; 2) організація комплексної, науково обґрунтованої оцінки об'єктів екологічної експертизи; 3) встановлення відповідності об'єктів експертизи вимогам екологічного законодавства, санітарних норм, будівельних норм і правил; 4) оцінка впливу діяльності об'єктів екологічної експертизи на стан навколишнього природного середовища, здоров'я людей і якість природних ресурсів; 5) оцінка ефективності, повноти, обґрунтованості та достатності заходів щодо охорони навколишнього природного середовища і здоров'я людей; 6) підготовка об'єктивних, всебічно обґрунтованих висновків екологічної експертизи [21].

5.3 Економічна ефективність

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідні дані для розрахунку техніко-економічної ефективності представлені в таблиці 5.1 [18]. Розрахунок техніко-економічної ефективності представлений в таблиці 5.2.

Економічний ефект від застосування нової машини обумовлений підвищенням її продуктивності, зниженням метало- та енергоємності, а також зниженням витрат на технічне обслуговування і ремонт по порівнянню з базовою при однаковій встановленої потужності електродвигунів.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку техніко-економічної ефективності застосування нової моделі вихрового захвату

Показники	Позначення	Одиниця вимірювання	Базовий варіант	Нова модель
1. Ціна оптова	C_0	грн.	125000	120000
2. Коефіцієнт перекладу оптової ціни до балансової, що враховує витрати на поставку, збірку і регулювання машин	m	-	1,2	
3. Річна нормативне навантаження	T	год.	1100	
4. Продуктивність	W	т/год.	2,5	3,5
5. Кількість обслуговуючого персоналу	L	люд.	1	
6. Годинна тарифна ставка	$Ч$	грн./год	40	
7. Витрати на зберігання	Z_x	грн./год	0,15	
8. Встановлена потужність	N	кВт.	22	
9. Вартість електроенергії	C_3	грн./кВт·год.	2,3	
10. Норма амортизаційних відрахувань	a	%	11,1	
11. Норма відрахувань на ремонт і технічне обслуговування	K_p	%	3,0	1,0
12. Коефіцієнт готовності за оперативному часу	K_o	-	1	

Розрахунок техніко-економічної ефективності застосування представлено в табл. 5.2.

Річний економічний ефект за приведеними витратами визначається за формулою:

$$E_p = [I_B + E \cdot K_B] - (I_H + E \cdot K_H)] \cdot W \cdot T \cdot K_o, \quad (5.1)$$

де I_B, I_H – прямі експлуатаційні витрати на одиницю продукції по базовій і новій машині;

E – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень (0,15);

K_B, K_H – питомі капіталовкладення, грн./т;

W – продуктивність нової машини, т/год;

T – річне навантаження, год;

K_O – коефіцієнт використання оперативного часу.

Річний економічний ефект від використання дробарки з «дека-решетом» складатиме:

$$E_p = [43,99 + 0,15 \cdot 54,55] - (30,45 + 0,15 \cdot 37,40) \cdot 3,5 \cdot 1100 \cdot 1 = 62033 \text{ грн.}$$

Термін окупності

$$T_{ок} = \frac{B}{E_p} = \frac{144000}{62033} = 2,3 \text{ роки.}$$

Енергетична оцінка дає можливість найбільш об'єктивно оцінити витрати сільськогосподарського виробництва в порівнянні з економічністю, яка істотно залежить від коливання ціноутворення і не дозволяє встановити рівень необхідних витрат енергії на подрібнення і технічний рівень розвитку технологій [19].

У даній роботі для оцінки енергетичної ефективності робочого процесу дробарки зерна використовували методику, наведену в [19].

Для порівняльної оцінки ефективності робочого процесу дробарки зерна використовували коефіцієнт енергетичних витрат:

$$K_C = \frac{E_{c.n.}}{E_{c.б.}}, \quad (5.2)$$

де $E_{c.n.}$ – сукупні витрати технологічного процесу, новою машиною, МДж / т;

$E_{c.б.}$ – базовий рівень сукупних витрат, МДж / т.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку енергетичної ефективності дробарки зерна

Показники	Позначення	Числові значення варіантів	
		Базовий варіант	Новий варіант

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маса, кг	M	425	370
Продуктивність, т/год	Q_D	2,5	3,5
Встановлена потужність, кВт	$\sum N$	22	
Обслуговуючий персонал, чол.	C	1	
Добовий обсяг робіт, т	S	10	
Число днів роботи в році	$n_{ДН}$	365	
Площа займана дробаркою, м	F	1,8	1,2

Сукупні витрати на технологічний процес в МДж/т визначалися за формулою:

$$E_C = E_{II} + \frac{E_{Ж} + E_{ОБ} + E_{ПОМ}}{Q_D}, \quad (5.3)$$

де E_{II} – прямі витрати енергії, МДж/т;

$E_{Ж}$ – витрати живої праці, МДж/год;

$E_{ОБ}$, $E_{ПОМ}$ – енергоємності обладнання та виробничого приміщення, МДж/год.

Прямі витрати енергії визначаються за формулою:

$$E_{II} = H_e + K_e, \quad (5.4)$$

Де H_e – витрата електроенергії, кВт·год/т;

K_e – коефіцієнт перекладу 1 кВт·год в 1 МДж, $K_e = 3,6$.

Витрата електроенергії при відсутності норм витрати визначається за формулою:

$$H_e = \frac{\sum N}{Q_D}. \quad (5.5)$$

Тоді прямі витрати енергії склали:

для базового варіанту

$$E_{II.Б} = \frac{22}{2,5} \cdot 3,6 = 31,68 \text{ МДж/т};$$

для нового варіанту

$$E_{II.Б} = \frac{22}{3,5} \cdot 3,6 = 22,63 \text{ МДж/т}.$$

Енерговитрати живого праці визначаються за формулою:

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{Ж} = n_{ч} \cdot \alpha_{Ж}, \quad (5.6)$$

де $\alpha_{Ж}$ – енергетичний еквівалент витрат живого праці, $\alpha_{Ж} = 0,9$ МДж /чол-год.

Енерговитрати живого праці для базового і нового варіантів однакові і рівні:

$$E_{Ж} = 1 \cdot 0,9 = 0,9 \text{ МДж/год.}$$

Енергоємність, що припадає на 1 годину роботи обладнання, розраховуємо за формулою:

$$E_{ОБ} = \frac{\epsilon_{ОБ}}{T_{Г}}, \quad (5.7)$$

де $T_{Г}$ – річне завантаження лінії, год:

$$T_{Г} = \frac{S}{Q_{Д}} \cdot n_{ДН}. \quad (5.8)$$

Загальна енергоємність обладнання, МДж:

$$\epsilon_{ОБ} = \alpha_{ОБ} \cdot M, \quad (5.9)$$

де $\alpha_{ОБ}$ – енергетичний еквівалент обладнання, $\alpha_{ОБ} = 104$ МДж/т.

Енергоємність, яка припадає на 1 годину роботи обладнання:

для базового варіанту

$$E_{ОБ.Б} = \frac{104 \cdot 0,425 \cdot 2,5}{10 \cdot 365} = 0,031 \text{ МДж/год;}$$

для нового варіанту

$$E_{ОБ.Б} = \frac{104 \cdot 0,37 \cdot 3,5}{10 \cdot 365} = 0,037 \text{ МДж/год.}$$

Енергоємність виробничих приміщень визначали за формулою:

$$E_{ПОМ} = \frac{\alpha_{ПОМ} \cdot F}{100 \cdot T_{Г}}, \quad (5.10)$$

де $\alpha_{ПОМ}$ – енергетичний еквівалент приміщення, $\alpha_{ПОМ} = 5025$ МДж/м².

Енергоємність виробничих приміщень:

для базового варіанту

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{OB.B} = \frac{5025 \cdot 1,8 \cdot 2,5}{100 \cdot 10 \cdot 365} = 0,062 \text{ МДж/год};$$

для нового варіанту

$$E_{OB.B} = \frac{5025 \cdot 1,2 \cdot 3,5}{100 \cdot 10 \cdot 365} = 0,058 \text{ МДж/год}.$$

Після підстановки отриманих значень в (4.3) визначали сукупні витрати:

для базового варіанту

$$E_{C.B} = 31,68 + \frac{0,9 \cdot 0,031 \cdot 0,062}{2,5} = 32,077 \text{ МДж/т};$$

для нового варіанту

$$E_{C.H} = 22,63 + \frac{0,9 \cdot 0,037 \cdot 0,058}{3,5} = 22,91 \text{ МДж/т}.$$

Коефіцієнт енергетичних витрат згідно (4.2)

$$K_e = \frac{22,91}{32,077} = 0,71.$$

Рівень інтенсифікації розраховували за формулою:

$$I = (1 - K_e) \cdot 100, \quad (5.11)$$

$$I = (1 - 0,71) \cdot 100 = 29\%.$$

Таким чином, розроблена молоткова дробарка має сукупні витрати енергії на 29% менше, ніж дробарка базового виробника, прийнята за базовий варіант.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Наведені та обґрунтовані в роботі рекомендації дозволяють розробляти та проектувати ефективні вихрові робочі органи робототехнічних та мехатронних систем з використанням запропонованої методики.

У кваліфікаційній роботі вирішено такі завдання:

- систематизовано відомі та нові завдання утримання об'єктів маніпулювання, що відрізняються тим, що утримання відбувається безконтактно або при малій контактній взаємодії із захопленням;

- розроблені та експериментально перевірені математичні моделі вихрових захватних пристроїв, призначених для автоматизації технологічних процесів та операцій, що вимагають обмеженого впливу на об'єкт маніпулювання;

- виконаний якісний та кількісний аналіз залежності сили, притягує об'єкт маніпулювання до робочої камери, в якій підтримується вихровий рух газу для різних значень діаметрів вихрової камери та діаметрів сопел;

- проведено аналіз залежності утримуючого зусилля, що створюється вихровим рухом газу всередині камери, від зазору між захватним пристроєм та об'єктом, що дозволяє виявити значення зазору, при якому відбувається утримання захоплюваного об'єкта та оцінити параметри базуючих елементів, що входять до конструкції захопленого пристрою;

- обґрунтовано побудову сіткової залежності розрахункової аеродинамічної моделі вихрового захватного пристрою, що дозволяє вибрати параметри розбиття

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделі на кінцеві елементи, отримані оцінки точності параметрів, що розраховуються від розбиття моделі на кінцеві елементи;

- виконано аналіз прикордонних шарів та аналіз вторинних течій у камері при математичному моделюванні методом кінцевих елементів, що дозволяє виявити ефективні конфігурації вихрової камери захватних пристроїв роботів;

- запропоновано методику проектування вихрових захватних пристроїв з авторськими доповненнями, що спирається на облік газодинамічних характеристик руху стисненого газу у вихровій камері;

- дана оцінка впливу пропускної здатності сопел на характеристики вихрового захватного пристрою; виконано експериментальне дослідження зразка вихрового захватного пристрої, що показує малу величину розбіжності з розрахунковими моделями;

- дано рекомендації щодо розширення області використання вихрових вакуумних захватних пристроїв.

					КРМ.133ГМмз_21.01.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		