

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК  
СЕКЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОЕКТУВАННЯ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**на тему:** «Система автоматизованого проектування імпульсних затворних торцевих ущільнень відцентрових компресорів»

за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»,  
освітньо-професійна програма «Інформаційні технології проектування»

**Виконавець роботи:** студент групи ІТ.мдн-91С Кузнецов Едуард Геннадійович

**Кваліфікаційна робота магістра  
захищена на засіданні ЕК  
з оцінкою**

\_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Науковий керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., проф. Лавров Є. А.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Голова комісії

\_\_\_\_\_

(підпис)

Шифрін Д. М.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних наук  
Секція інформаційних технологій проектування  
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»  
Освітньо-професійна програма «Інформаційні технології проектування»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Зав. секцією ІТП

\_\_\_\_\_ В. В. Шендрик  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА СТУДЕНТОВІ

*Кузнєцов Едуард Геннадійович*

**1 Тема роботи** Система автоматизованого проектування імпульсних затворних торцевих ущільнень відцентрових компресорів

**керівник роботи** проф. Лавров Євгеній Анатолійович, д.т.н.,

затверджені наказом по університету від «13» листопада 2020 р. № 1765 – III

**2 Строк подання студентом роботи** «07» грудня 2020 р.

**3 Вхідні дані до роботи** технічне завдання для розробки системи автоматизованого проектування затворного імпульсного торцевого ущільнення

**4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** аналіз предметної області, моделювання та проектування розроблюваного застосунку, реалізація системи автоматизованого проектування газозатворного імпульсного торцевого ущільнення

**5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)** актуальність проблеми, мета та задачі проекту, математична модель проектованого ущільнення, алгоритмічне забезпечення розроблюваної системи проектування, інструменти та засоби реалізації, моделювання програмного продукту, результати роботи розробленого застосунку, висновки

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

01.09.2020

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	01.09.20 – 08.09.20	
2	Планування робіт	09.09.20 – 15.09.20	
3	Розробка математичної моделі ГзІТУ для створення системи автоматизованого проектування	16.09.20 – 30.09.20	
4	Розробка алгоритмічного забезпечення САПР ГзІТУ	01.10.20 – 15.10.20	
5	Вибір засибів реалізації системи автоматизованого проектування ущільнень	16.10.20 – 18.10.20	
6	Розробка моделі САПР	19.10.20 – 22.10.20	
7	Розробка модулів розрахунку геометрії елементів ущільнення	23.10.20 – 30.10.20	
8	Розробка модулів моделювання експлуатації ущільнення	01.11.20 – 15.11.20	
9	Розробка модуля програмування сценарію креслень мовою AutoLISP	16.11.20 – 30.11.20	
10	Реалізація і тестування САПР ГзІТУ	01.12.20 – 07.12.20	

Студент

(підпис)

Кузнєцов Е. Г.

Керівник роботи

(підпис)

д.т.н., проф Лавров Є. А.

## РЕФЕРАТ

Тема роботи «Система автоматизованого проектування імпульсних затворних торцевих ущільнень відцентрових компресорів»

Пояснювальна записка складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 36 найменувань, додатка. Загальний обсяг роботи – 70 сторінок, у тому числі 60 сторінок основного тексту, 4 сторінки списку використаних джерел, 6 сторінок додатків.

У роботі виконано дослідження актуальності поставленої проблеми, а також предметної області, наведена її характеристика, існуючі проблеми та алгоритми. Проведено аналіз існуючих аналогів рішень у сфері розробки ущільнювальних систем. Виконано проектування продукту проекту за допомогою UML та IDEF0 на основі проведеного структурно-функціонального аналізу продукту проекту. Описано практичну частину реалізації проекту, детально представлено математичне та алгоритмічне забезпечення процесу розробки системи САПР газозатворного імпульсного торцевого ущільнення. Результатом проведеної роботи є розроблений застосунок САПР ГзІТУ.

Наукова новізна та практична цінність рботи полягає в тому, що розроблена математична модель функціонування газатворного імпульсного торцевого ущільнення, дозволяє визначати геометричні характеристики ущільнювальних поверхонь в залежності від параметрів експлуатації; розроблений алгоритм та методика чисельного розв'язання рівняння Рейнольдса, які дозволяють отримати розв'язки для широкого кола задач газо- та гідродинаміки ущільнень; розроблена технологія проектування довела, що використання запропанованих математичних моделей, алгоритмічного та програмного забезпечення забезпечує гнучкість та наглядність процесу проектування, зменшує трудомісткість та затрати на час розробки та можуть бути застосовані на підприємствах як елемент загальної системи автоматизованого проектування виробів компресорної промисловості, забезпечити їх якість та конкурентноспроможність.

Ключові слова: BlackBox Component Builder, Component Pascal, САПР, імпульсне ущільнення, метод граничних елементів.

# ЗМІСТ

	с.
Вступ	5
1 Аналіз предметної області	7
1.1 Загальна характеристика предметної області	7
1.2 Вибір предмета дослідження	12
1.3 Вибір засобів розробки САПР	14
1.4 Вибір мети і завдань дослідження	20
1.5 Висновки	21
2 Розробка фізичної та математичної моделі ГзІТУ	23
2.1 Визначення характеристик плинуща газу в торцевому зазорі	23
2.2 Визначення діючих в зазорі сил	28
2.3 Висновки	33
3 Розробка чисельної моделі робочого процесу ГзІТУ	35
3.1 Чисельний метод визначення тиску в торцевому зазорі	35
3.2. Реалізація чисельного методу й моделювання поля тиску в зазорі	44
3.3 Висновки	47
4 Реалізація системи автоматизованого проектування ГзІТУ	48
4.1 Розробка моделі САПР ГзІТУ	48
4.2 Реалізація моделі САПР	53
4.3 Висновки	58
Висновки	59
Список літератури	61
Додаток А	65

## ВСТУП

Інтенсивний розвиток науки і техніки постійно стимулює створення все більш потужних і продуктивних насосних і компресорних агрегатів, що має на увазі збільшення їх робочих параметрів (частот обертання, подач і тисків). У зв'язку з цим до вузлів цих агрегатів пред'являються високі вимоги надійності і довговічності. До найбільш відповідальних вузлів насосів і компресорів відносяться кінцеві ущільнення і опори валів. На сьогоднішній день традиційні ущільнювальні системи не завжди відповідають темпам зростання сучасної промисловості і кінцеві ущільнення є одними з найбільш ненадійних вузлів агрегатів. Відмова ущільнення, як правило, супроводжується не тільки забрудненням навколишнього середовища, але і великими матеріальними витратами через простої машини. Тому на виробництві замість одного насосного (або компресорного) агрегату додатково використовують ще один, а то і два резервних. Такий стан речей незмінно стимулює розробників на створення більш ефективних і, головне, надійних ущільнювальних систем.

З кінця ХХ століття все зростаючу популярність на ринку ущільнювальних систем набувають затворні вузли, що працюють на газовому замщенні. В них використовуються два газодинамічних ущільнення, між якими подається нейтральний до перекачуваного продукту буферний (затворний) газ. Ці ущільнення мають ряд позитивних якостей (порівняно з попередніми ущільнювальними системами з буферною рідиною): забруднення продукту затворним газом мізерно мало (кілька десятків мілілітрів газу в хвилину), порівняно проста і, отже, більш надійна система подачі затворного середовища (газу), можливість роботи в широкому температурному діапазоні (перекачування розплавів, криогенна техніка тощо) і найголовніше – значно більший ресурс (приблизно в п'ять разів вище, ніж ресурс ущільнень на рідинному змащенні).

Описані переваги газових затворних ущільнень і складності, пов'язані з їх створенням, в сукупності говорять про те, що актуальність проблеми створення газових ущільнень з роками не тільки не знизилася, але і навпаки ще більше

загострюється. Тим більше, що потреба в таких ущільненнях постійно зростає. Тому розробка, дослідження і конструювання нових ущільнень на газовому змащенні – нагальне завдання сучасної промисловості. Її рішення буде затребуване відразу декількома галузями народного господарства: хімічним і нафтопереробним виробництвом, ядерною енергетикою, легкою промисловістю.

Дана робота присвячена розробці і створенню системи автоматизованого проектування нової конструкції безконтактного ущільнення – газозатворного імпульсного торцевого ущільнення, що поєднує в собі технологічність одинарного механічного торцевого ущільнення і переваги сучасних зразків газодинамічних подвійних ущільнень.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Загальна характеристика предметної області

Потреби різних галузей промисловості в нових високонадійних і економічних компресорах на високі параметри безперервно зростають. Розробка нових технологічних процесів і інтенсифікація існуючих (синтез і транспорт аміаку, нафтопереробка, циклічне закачування газоконденсатних родовищ, газліфтний видобуток нафти) немислимі без створення нових машин. Досвід розробки та експлуатації компресорів показує, що забезпечення сучасного технічного рівня агрегату багато в чому залежить від надійності і герметичності (якості) кінцевих ущільнень обертового валу, тобто, пристроїв, що запобігають або обмежують витіки перекачуваного середовища в місцях виходу валу з корпусу.

Надійна і ефективна герметизація валів насосів є однією з найскладніших і важливих проблем машинобудування. Труднощі, з якими доводиться стикатися при розробці кінцевих ущільнень для насосів в хімічній, нафтогазовидобувній і переробній промисловості, обумовлені важкими умовами їх роботи; широким діапазоном робочих температур, специфічними властивостями ущільнювальних середовищ (хімічна і корозійна активність, радіоактивність, вибухопожежебезпека). Вихід з ладу ущільнення призводить до викиду перекачуваного середовища в робоче приміщення, внаслідок чого виникає реальна небезпека вибуху, пожежі, а також забруднення навколишнього середовища.

Поки ущільнення залишаються самими ненадійними вузлами. За даними різних джерел, у тому числі зарубіжних, до 80% відмов насосів і компресорів відбувається з вини ущільнень. Тому проблема підвищення їх надійності є важливим і актуальним завданням. Її рішення пов'язане зі значними труднощами, які обумовлені, з одного боку, важкими умовами експлуатації, а з іншого – жорсткими вимогами щодо забезпечення надійності і герметичності. Проблемою



створення надійних і герметичних кінцевих ущільнень валів насосів займаються вже більше 100 років. За цей час розроблено велику кількість різноманітних ущільнювальних пристроїв, що відрізняються принципом дії, конструкцією, областю застосування. Наявне розмаїття конструкцій ущільнень свідчить, що досі кардинального вирішення проблеми немає і, мабуть, найближчим часом не буде.

Тривалий досвід застосування ущільнень в відцентрових машинах дозволив сформулювати до них дві основні вимоги:

- зберігати герметичність при істотних перепадах робочих тисків в машині;
- забезпечувати працездатність рухомого з'єднання ротор-статор.

Пошук компромісу між цими взаємовиключними вимогами призвів до формування двох основних груп ущільнень: контактних і безконтактних. Найефективнішими в цих групах є торцеві ущільнення, в яких герметизація відцентрового агрегату відбувається по торцевому стику між деталлю, що обертається (разом з ротором) і нерухомою деталлю (закріпленою в корпусі агрегату) – ущільнювальними (торцевими) кільцями. Найбільш перспективними серед них є безконтактні – з підведенням в торцевий зазор між ущільнювальними кільцями рідини або газу.

За останні десятиліття створені різноманітні конструкції безконтактних торцевих ущільнень з саморегульованим зазором [1 – 5]. Величина зазору в такій торцевій парі може досягати 3..30 мкм, а в окремих випадках і 40 ... 50 мкм. Ці ущільнення досить надійно працюють при великих швидкостях в широкому діапазоні робочих параметрів, забезпечуючи малі протікання і герметичність на стоянці. Ущільнююча дія в безконтактних торцевих ущільненнях здійснюється за рахунок великого гідравлічного опору зазору між поверхнями ущільнювальних кілець. Його величина дозволяє забезпечити ефективне охолодження торцевих поверхонь за рахунок протікання робочого середовища і задовольнити при цьому вимогу герметичності.

Безконтактні торцеві ущільнення відповідно до способу врівноваження рухомого в осьовому напрямку кільця діляться на:

– гідро- і газостатичні – з примусовою подачею розділяє торцеві поверхні середовищем безпосередньо в торцевій (робочій) зазор;

– гідро- і газодинамічні – із залученням в торцевий зазор перекачуваного (ущільнювального) та / або буферного (затворного) середовища за рахунок створення на торцевих поверхнях спеціального мікрорельєфу у вигляді спіральних конавок і сходинок, які під час обертання створюють гідро-газодинамічні ефекти руху середовищ в зазорі;

– імпульсні.

Торцеві ущільнення з імпульсним врівноваженням мають давню історію (авторське свідоцтво на винахід отримано в 1974 р.) [6 – 7]. Воно замислювалося як альтернатива гідродинамічним ущільненням, що містять потенційно ненадійні або технологічно важковиконувані елементи мікрорельєфу [1, 3, 9 – 11]. Конструктивна схема імпульсного торцевого ущільнення показана на рисунку 1.1.

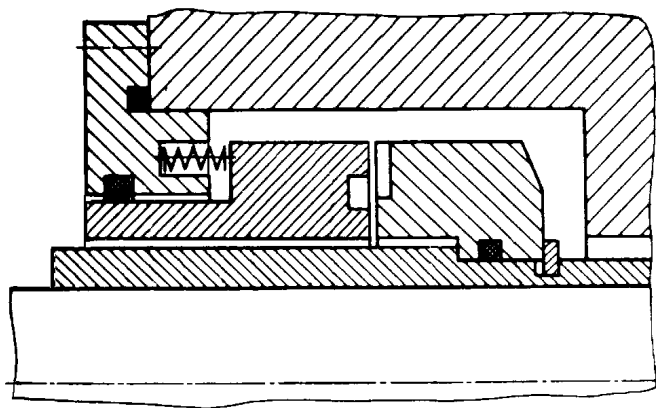


Рисунок 1.1 – Імпульсне торцеве ущільнення

На робочій поверхні рухомого в осьовому напрямку кільця розташовані окремі замкнуті камери, а на поверхні опорного диска кілька підвідних каналів (живильників), які при обертанні диска послідовно з'єднують камери з ущільнювальною порожниною відцентрового насоса. Під час цих з'єднань в камери потрапляє (впорскується) рідке ущільнювальне середовище. Протягом часу, коли живильники не з'єднані з камерами накопичене в них (камерах) ущільнювальне середовище стікає в торцевий зазор, завдяки чому здійснюється

постійне надходження рідини в торцевий зазор для його підтримки, а також для охолодження робочих поверхонь.

Принцип дії ущільнення базується на тому, що осереднений за період між вприсками тиск ущільнюваної рідини в кожній з камер тим більше, чим менше торцевий зазор і чим більше частота обертання ротора. Періодичні уприскування ущільнювальної рідини в камери викликають в них синхронні імпульси підвищення тиску, що призводить до стрибкоподібної місцевої зміни тиску рідини в торцевому зазорі. Частота цих стрибків тиску пропорційна кількості камер і частоті обертання ротора. Таким чином, в робочому зазорі відбуваються місцеві коливання тиску, що носять імпульсний характер і призводять до коливань тиску рідини в торцевому зазорі на робочі поверхні ущільнювальних кілець. В результаті цього рухоме в осьовому напрямку кільце схильне високочастотним осьовим вібраціям. При відсутності обертання ротора вприскування нової порції ущільнюваної рідини в камери не відбувається, а залишків тиску в них недостатньо, щоб розкрити торцевий зазор – він закритий і ущільнення працює як стоянчне. Змінюючи форму підвідних каналів, можна впливати на чутливість ущільнення до частоти обертання [3].

Імпульсні ущільнення на рідинному робочому середовищі (рідинному змащенні) досліджені в широкому діапазоні параметрів: ущільнювальний перепад тиску – до 16,0 МПа, швидкість ковзання – до 70 м/с [9 – 12]. Є досвід успішної експлуатації ущільнень цього типу на високооборотних живільних насосах атомних і теплових електростанцій. У спеціальній літературі описані випадки застосування їх в криогенній техніці в умовах, коли ущільнювальна криогенна рідина близька до стану насичення (рідкий і газоподібний азот з температурою  $-200 \dots +25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [13 – 18].

В результаті пошуку конструкції ущільнення, альтернативного досить ефективним газодинамічним, що теж буде працювати на газовому робочому середовищі, але разом з тим буде вільним від технологічно сложновиконуваних, потенційно ненадійних і схильних до засбруднення газодинамічних канавок і сходинок, вирішено було звернутися до напрацювань по імпульсному ущільненню, яке протягом усього часу незмінно набирає популярність. Дослідна

конструкція нового імпульсного ущільнення, що використовує для розділу торцевих поверхонь не рідину, а газ, була вперше розроблена і створена в лабораторії Герметичності і вібронадійності відцентрових машин Сумського державного університету (рисунок 1.2).

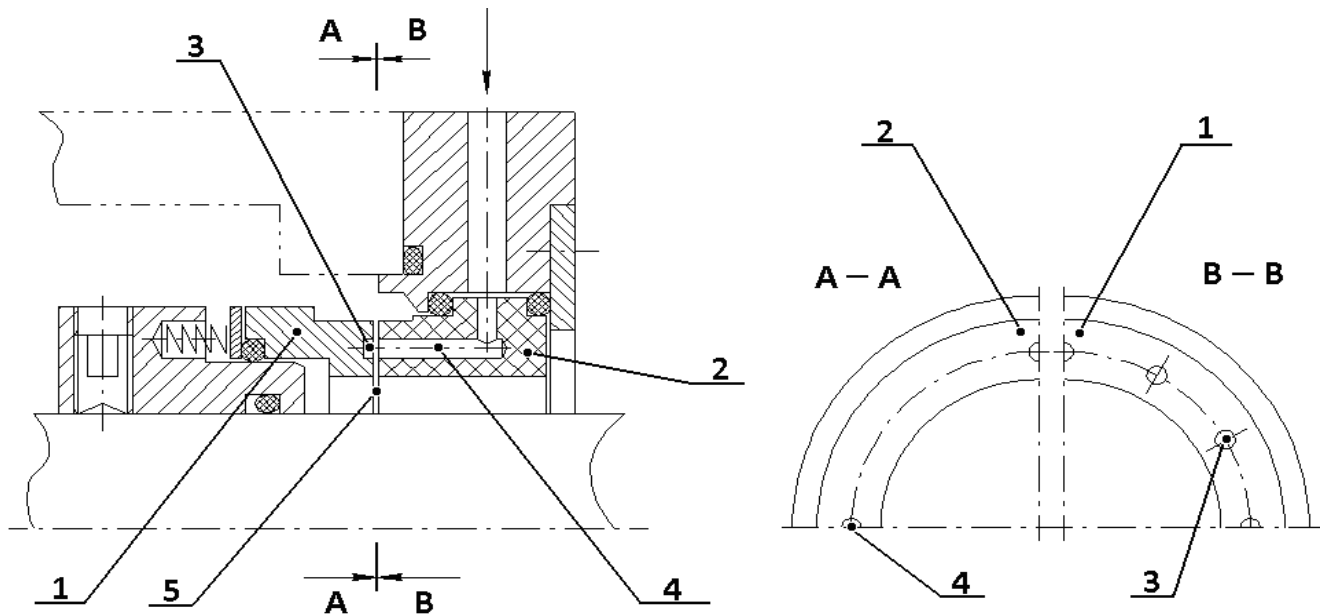


Рисунок 1.2 – Газозатворне імпульсне торцеве ущільнення (ГЗІТУ):

- 1 – обертове торцеве кільце з камерами;
- 2 – нерухоме торцеве кільце з живильником;
- 3 – замкнута камера;
- 4 – канал живлення (живильник);
- 5 – робочий торцевий зазор

У цьому імпульсному ущільненні, яке отримало назву газозатворного імпульсного торцевого ущільнення (ГЗІТУ), в камерах відбувається акумулювання не ущільнювального середовища, а затворного газу, що подається живильниками ззовні. Досвід експлуатації показав, що робота ГЗІТУ характеризується стійкістю безконтактного режиму і витокami, порівнянними з витокami через газостатичні ущільнення. Завдяки використанню імпульсного способу створення в торцевому зазорі газової плівки, що розділяє робочі поверхні, розроблено універсальне саморегульоване ущільнення для роботи з

рідкими і газоподібними ущільнювальними середовищами, яке при цьому не потребує високотехнологічного і трудомісткого профілювання робочих поверхонь газодинамічними канавками і сходами. Потреби промисловості зумовили практичне застосування дослідних зразків ГзІТУ. Вони успішно експлуатуються на відцентрових насосах [19], а в 2000 р. на конструкцію ущільнення отримано патент [20].

Проведений ретельний огляд спеціальних науково-технічних джерел інформації показав, що на сьогоднішній день застосування кінцевих ущільнень роторів на газовому змещенні – характерна риса найдосконаліших насосів і турбокомпресорів, що визначає вигляд цих машин в майбутньому. Крім того, газозатворне імпульсне торцеве ущільнення, поєднуючи в собі простоту конструкції і технологічність виготовлення ущільнювальних кілець, не поступається за своїми характеристиками сучасним складним подвійним ущільненням, що використовують спеціальні газодинамічно спрофільовані кільця.

## **1.2 Вибір предмета дослідження**

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що сприяння подальшому просуванню на ринок компонентів відцентрових машин газозатворного імпульсного ущільнення є актуальним завданням вітчизняного машинобудування. Дане ущільнення може бути використано в компресорах малої і середньої продуктивності для запобігання витоків при стисненні й транспортуванні небезпечних для навколишнього середовища газоподібних середовищ.

Успішному впровадженню ГзІТУ у виробництво і промислове застосування може сприяти систематизація відомостей про розрахунок і конструювання окремих елементів ущільнення, зведення їх в єдину розрахункову модель. Це дозволить аналізувати спільну роботу складових елементів і прогнозувати роботу ГзІТУ в цілому. Така модель інженерного розрахунку ущільнення може бути надалі формалізована автоматизована.

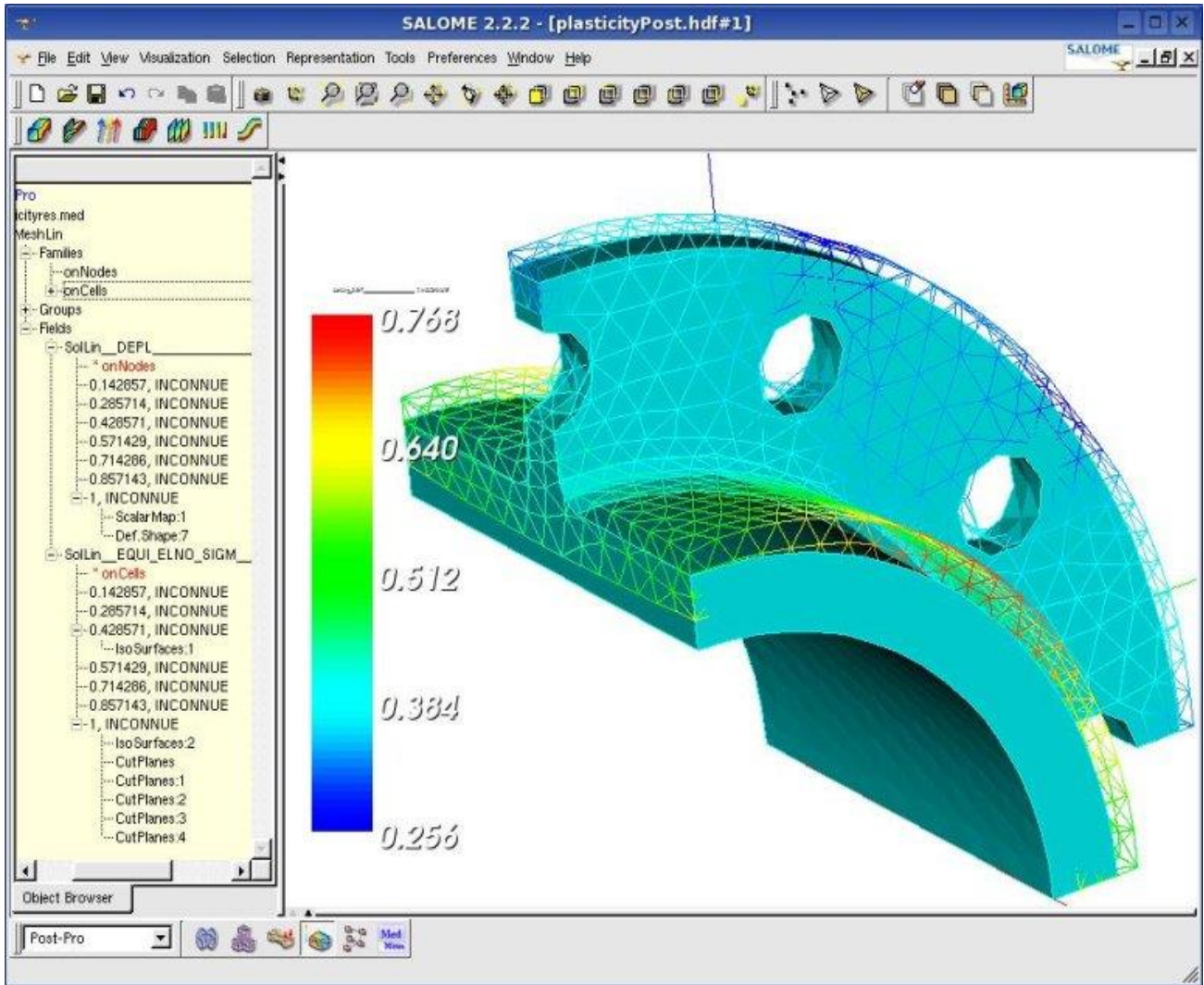


Рисунок 1.3 – Приклад гібридної системи автоматизованого проектування та моделювання SALOME.

Промислові системи атоматизованого проектування ущільнень, що використовуються зараз, не поширені у вільному доступі і є інтелектуальною власністю підприємств-виробників (рисунок 1.3). Існує ряд підприємств України, які спеціалізуються виключно на проектуванні та виготовленні ущільнювальних систем. Як правило, вони залучені в тісну і довгострокову взаємодію з постійними замовниками і постачальниками. Тому пропозиція відволікання частини вже запланованих ресурсів на впровадження нового ущільнення в короткостроковій перспективі не знайде у них відгуку. Як альтернативу цим підприємствам можна розглядати підприємства, що займаються випуском власних та / або модернізацією сторонніх компресорних агрегатів, що мають власний кадровий і ресурсний потенціал для розробки і виготовлення ущільнень. Такі підприємства

мають власні інженерні напрацювання і системи проектування для розробки ущільнень і можуть проявити потенційний інтерес до ущільнення нової конструкції. Застосовувані у них системи розробки, як правило, вузькоспеціалізовані і оптимізовані тільки під один актуальний на сьогодні тип ущільнень. Такий підхід має на увазі масштабування базової конструкції ущільнення для заданого виконання цільового агрегату і для зазначеного діапазону робочих параметрів. При цьому діапазон ефективності кожної базової конструкції ущільнення обмежений рядом експлуатаційних і габаритних параметрів агрегатів, а так само й фізичними властивостями їх робочих середовищ.

Слід зазначити, що з прийняттям в розробку нових перспективних конструкцій ущільнень такі САПР або виводяться з експлуатації, або, що економічно обґрунтовано, піддаються глибокій модернізації. Тому подібні САПР повинні мати максимально підготовлений для доповнень внутрішній уристрій. Під цим мається на увазі і структура, що складається з замінних функціональних блоків (модуль проектувального розрахунку елементів конструкції, модуль моделювання роботи, модуль моделювання аварійної ситуації, модуль бази даних стандартизованих деталей і т.д.), і підготовка отриманої креслярської та супровідної документації для подальшої обробки у зовнішній сторонній системі для роботи з кресленнями і моделями (наприклад, SolidWorks, AutoCAD, Inventor, КОМПАС і ін.).

Таким чином, представляється своєчасним розробка і створення системи проектування ГзІТУ на принципах, викладених вище.

Об'єктом даного дослідження виступає проектування газозатворного імпульсного торцевого ущільнення.

В якості предмета дослідження обрані модель та інформаційна технологія автоматизованного проектування ГзІТУ.

Перед початком робіт з вироблення концепції проекрованої САПР необхідно провести вибір лінгвістичного забезпечення системи: визначити методи, засоби та пов'язані з ними можливості розробки.

## 1.3 Вибір засобів розробки САПР

### 1.3.1 Лінгвістичне забезпечення САПР

Значення і роль лінгвістичного забезпечення в САПР визначається тим, що ці системи засновані на взаємодії людини (користувача) і персонального комп'ютера (виконавця) і є за своєю суттю людино-машинним комплексом. Спілкування між користувачем і комп'ютером здійснюється за допомогою спеціальних мов різного рівня, що забезпечують видачу завдань і директив по їх виконанню, переміщень масивів інформації, передачу розпоряджень про розташування інформації в певному розділі пам'яті, а також про режим роботи обчислювальної системи і послідовності обробки видаваних завдань.

Лінгвістичне забезпечення включає в себе мовні засоби розробки та експлуатації програмного забезпечення, сукупність мовних засобів і фахівців, що володіють ними. Розрізняють мови написання програм (мови розробників) і мови тієї предметної області, якій присвячена САПР. Як правило, саме за допомогою мов предметної області САПР здійснюється процес проектування, тому ці мови називають мовами проектування. До складу лінгвістичного забезпечення входить також набір словників, що утворюють словниковий склад інформаційної системи.

Мови програмування призначені для написання програм при розробці програмного забезпечення САПР, тобто ці мови є засобами розробників САПР. В якості мов програмування в САПР знаходять застосування машинно-орієнтовані мови і алгоритмічні мови високого рівня. Алгоритмічні мови високого рівня в порівнянні з машинно-орієнтованими мовами зручні для реалізації алгоритмів чисельного аналізу, легше освоюються інженерами, дозволяють підвищити продуктивність праці програмістів при розробці програм і їх адаптації до різних типів комп'ютерів, операційних систем.

Мови проектування орієнтовані на представлення і перетворення вихідної інформації при виконанні проектних процедур. Велика частина мов проектування відноситься до засобів користувачів САПР, які застосовують їх в процесі своєї проектної діяльності. Вони повинні задовольняти таким основним вимогам, як:



ефективність (точність передачі завдання користувача і лаконічність запису); повнота (можливість опису всіх об'єктів проектування, а також всіх дій, що мають відношення до мети проектування); несуперечливість (кожне речення, сформульоване в термінах даної мови і з використанням його синтаксису, повинно мати природну семантичну інтерпретацію / сенс); розширюваність (забезпечення можливості доповнення мови відповідно до розвитку предметної області); виразність і проблемна орієнтація (забезпечення простоти вивчення і використання мови проектувальниками-непрограммістами); близькість до природної мови.

Важливість вибору мов при розробці САПР важко переоцінити. Всі мовні проблеми не можуть бути вирішені введенням однієї універсальної мови проектування, як правило, мало відомого проектувальнику і створючого для нього психологічний бар'єр при використанні системи. Ефективне використання мов програмування вимагає спеціальних знань і володіння сучасними технологіями програмування. Розробка на їх основі спеціалізованих програмних комплексів для САПР вельми трудомістка.

Дані обставини привели до необхідності створення спеціальних, зручних для проектувальника, мов, що перетворюють систему в співрозмовника, який «розуміє» професійну мову проектувальника і «розмовляє» з ним цією мовою. В результаті були розроблені алгоритмічні мови – проблемно-орієнтовані мови ПОМ, орієнтовані на певні об'єкти проектування і проектні процедури. По суті, ПОМ, хоча і називаються мовами, насправді являють собою комплекс лінгвістичних і програмних засобів. Повноцінна ПОМ повинна включати в себе набір термінів; інтерпретатор з ПОМ; засоби синтаксичного аналізу; бібліотеки базових функцій ПОМ; засоби інтерпретування директив; засоби організації режимів макетного введення-виведення і режиму роботи користувача з меню; інтерфейс для зв'язку з СУБД; СУБД і база даних предметної області ПОМ; засоби розширення ПОМ.

Для вирішення завдання, записаної на ПОМ, може бути сформований набір вказівок (директив). Такий набір називають макросом. Макрос може бути представлений одним терміном (термінальним символом), що сприймається і

розкривається інтерпретатором як зазначений набір (послідовність) директив. Засоби пакетування директив забезпечують створення і налагодження нових директив ПОМ і макросів з включенням їх в систему. Засоби додавання макросів забезпечують можливість розширення ПОМ по вертикалі.

Засоби організації режимів, меню, а також засоби формування макетів (екранних форм) забезпечують інтерфейс користувача, через який він взаємодіє з системою. Користувач формує на екрані терміналу введення-виведення запит на відповідній ПОМ із зазначенням режиму роботи (пакетного або діалогового). Введення необхідних даних в систему забезпечують шляхом заповнення системою макета, що видається. Отримавши відповідь на директиву, користувач або вибирає в представленому меню одну з пропонованих йому подальших дій, або дає можливість працювати системі з автоматично обраними параметрами («за замовчуванням»). Всі переходи з одного режиму роботи в інший наказують директиви ПОМ. При роботі в будь-який момент може бути викликана сервісна довідкова інформація (навчальна функція). Висновок довідкової інформації не впливає на виконання директив.

Можливості ПОМ мають виключно важливе значення при автоматизованому проектуванні. Вони не тільки безпосередньо впливають на продуктивність і рівень автоматизації проектування, але і визначають складність і характер робіт користувачів із засобами САПР, можуть зробити ці роботи більш привабливими і навпаки. Інтерфейс користувача САПР повинен бути «дружнім», що в значній мірі визначають можливості ПОМ.

1.3.2 Вибір мов програмування для розробки САПР і для її взаємодії із зовнішніми засобами проектування.

В якості робочої мови програмування були розглянуті три сучасних мови, що отримали застосування в новітніх проектах наукових обчислювальних систем і систем автоматичного проектування і управління:

C# – базова мова інтегрованого середовища розробки технології .NET, представлена в популярній лінійці продуктів Visual Studio компанії Microsoft (США), відноситься до сімейства C / C++;

Component Pascal – подальший розвиток сімейства мов промислового застосування Modula / Oberon компанії Oberon microsystems AG у складі Eidgenössische Technische Hochschule (Швейцарія). У комплексі з фреймворком BlackBox – є універсальною екосистемою розробки наукових обчислювальних комплексів і масштабованих систем широкого спектру автоматизації;

Julia – мова програмування загального призначення, що має розвинені засоби проведення чисельного аналізу, інтегроване середовище розробки – Julia Studio, Розробник – Massachusetts Institute of Technology (США).

Огляд спеціалізованих інтернет-видань дозволив зробити наступні висновки.

Технологія .NET після того, на неї як були переведені мови Basic, C++ і, власне, C# (створений спеціально для цієї технології на основі досвіду Delphi / C++Builder і Oberon), зараз надає інтегровані засоби розробки програм для практично всіх інших давно відомих мов програмування. Таким чином, можливості .NET набагато ширше, ніж у окремих мов, що існують зараз, але не в плані написання програм для вирішення конкретних наукових завдань, а в плані використання різних збірок компонентів, написаних на різних мовах програмування, а також при приєднанні збірок в єдиний проект через Інтернет.

Однак за ці переваги і широкі комунікаційні можливості доводиться, приймаючи постійно зростаючі вимоги до апаратної частини комп'ютерів, розплачуватися значним ускладненням мов. Таким чином, при розробці наукових обчислювальних програмних продуктів науковим працівникам в цьому випадку доводиться займатися вивченням тонкощів мови програмування .NET-технології, що забирає значний час від вивчення тонкощів тієї наукової проблеми, якою вони займаються. Враховуючи, що при цьому доводиться проводити одночасно абсолютно різні розрахунки, наприклад, моделювання поведінки різних систем, проведення статистичної обробки отриманих даних, економічні розрахунки ефективності пропонованих рішень тощо, мова програмування для науковців повинна, зберігши можливість реалізувати все перераховане вище, залишатися максимально доступною як в плані читання коду починаючим програмістом, так і

в плані оперативного внесення в код різних коректур. Мова C# у складі рідного середовища .NET сьогодні не повною мірою відповідає цим вимогам.

Молода мова програмування Julia, що розвивається в даний час, призначена переважно для наукових обчислень і просуває сучасну парадигму створення програмних комплексів. Її розробники ставили перед собою мету отримати засіб розробки обчислювальних додатків, які зможуть скласти альтернативу відомому потужному математичному інструментарію MATLAB і при цьому будуть мати безпрецедентною продуктивність. Однак, незважаючи на те, що мова спочатку позиціонувалася як універсальний інструмент математика, після публічної бета-версії 2012 року мова стала демонструвати швидке проникнення в область мов програмування спеціальної обробки великих обсягів даних. А з 2018 року (року виходу офіційної версії 1.0.0) у своїх релізах вона показав посилення тенденцій у вдосконаленні можливостей переважно технологій Data Science. Завдяки стабільному синтаксису, підтримуваній мові сценаріїв і JIT-компіляції в наукових колах спостерігається серйозний інтерес до Julia. Однак досі мова не може похвалитися достатньою кількістю обчислювальних пакетів (бібліотек), що не дозволяє поставити її на одну планку ні з MATLAB'ОМ, ні з мовами R і Fortran, конкурентом яким вона покликана бла стати. Цю проблему поки вдається вирішувати за допомогою використання сторонніх бібліотек, написаних для C / C++ і Python.

Component Pascal є найкомпактнішою мовою високого рівня, що зберігає спадкоємність традиціям структурного і модульного програмування, що забезпечує високу надійність програмного забезпечення. Будучи універсальною мовою, вона послідовно стає популярною в академічному середовищі як спосіб запису алгоритмів (прийшла на зміну Фортрану) і як мінімальна мова для організації досліджень. А пов'язаний з нею компонентний каркас BlackBox Framework абстрагує вченого-розробника від використовуваної платформи, надаючи високорівневі абстракції для побудови складних програмних систем з тривалим періодом еволюції і високими вимогами до надійності. Це актуально для великої категорії програмістів-«непрофесіоналів» – інженерів і вчених всіляких спеціальностей, у яких немає часу на освоєння мов та інструментів

професійних програмістів, але є нагальна необхідність швидко і правильно вирішувати поточні завдання.

Таким чином, з розглянутих варіантів в якості середовища і мови розробки САПР були обрані BlackBox Component Builder з мовою програмування Component Pascal. BlackBox являє собою операційне середовище (свого роду мікро-ОС), що працює поверх встановленої ОС. Це операційне середовище може повністю або частково включатися в кінцевий додаток (разом з компілятором), дозволяючи цьому додатку легко розширюватися і перебудовуватися «на льоту».

В якості середовища для представлення і обробки документації спроектованої за результатами розрахунків і моделювання конструкції ущільнення розглядалися дві системи: КОМПАС і AutoCAD. В силу вбудованої можливості програмувати створення документів без задіяння засобів API, а за допомогою скриптових файлів (сценаріїв), вибір зроблений на користь Autocad'а. в якості мови сценаріїв в ньому використовується AutoLISP / VisualLISP. AutoLISP є невеликим, динамічно масштабованим діалектом мови Lisp (мови функціонального програмування декларативного / описового типу, на відміну від таких процедурних мов, як C, Fortran, Pascal). AutoLISP є ПОМ, в якому програми і дані представляються системами лінійних списків символів (функцій).

Таким чином, функціонування розроблюваної САПР організується в наступному порядку: розрахунок параметрів конструкції ущільнення і моделювання його роботи виконується засобами BlackBox і вся вихідна документація на виготовлення ущільнення в матеріалі створюється у вигляді файлів-сценаріїв на ПОМ AutoLISP для читання в Autocad'і.

#### **1.4 Вибір мети і завдань дослідження**

На основі вищевикладеного сформульовано мету дослідницької роботи та сформульовано завдання для її досягнення.

Мета роботи: розробити систему автоматизованого проектування газозатворного імпульсного торцевого ущільнення компресорів.

Завдання:

- розробити математичну модель ГзІТУ для створення системи автоматизованого проектування;
- розробити алгоритмічне забезпечення САПР ГзІТУ;
- вибрати засоби реалізації системи автоматизованого проектування;
- розробити модель САПР;
- розробити модуль розрахунку геометрії елементів ущільнення;
- розробити модуль моделювання експлуатації ущільнення;
- розробити модуль програмування сценарію креслень на мові AutoLISP;
- реалізувати і протестувати САПР ГзІТУ.

## 1.5 Висновки

Проаналізовано останні тенденції в сфері конструювання ущільнень відцентрових агрегатів. На сьогоднішній день застосування кінцевих ущільнень роторів на газовому змещенні – характерна риса найдосконаліших насосів і турбокомпресорів, що визначає вигляд цих машин в майбутньому. Газозатворне імпульсне торцеве ущільнення, поєднуючи в собі простоту конструкції і технологічність виготовлення ущільнювальних кілець, не поступається за своїми характеристиками сучасним складним подвійним ущільненням, що використовують спеціальні газодинамічно спрофільовані кільця.

Успішному впровадженню ГзІТУ у виробництво і промислове застосування може сприяти систематизація відомостей про розрахунок і конструювання окремих елементів ущільнення, зведення їх в єдину розрахункову модель. Це дозволить аналізувати спільну роботу складових елементів і прогнозувати роботу ГзІТУ в цілому. Тому представляється своєчасним розробка і створення системи проектування ГзІТУ на принципах модульності та взаємодії зі сторонніми системами для роботи з кресленнями і моделями, такими як наприклад, SolidWorks, AutoCAD, Inventor, КОМПАС тощо.

З розглянутих варіантів в якості середовища і мови розробки САПР обрані BlackBox Component Builder з мовою програмування Component Pascal. В якості мови сценаріїв креслень вибрана AutoLISP / VisualLISP – проблемно-орієнтована мова, в якій програми і дані представляються системами лінійних списків символів (функцій).

Виконаний вибір напрямку, об'єкта та предмета дослідження. Сформульвані мета дослідження та визначені задачі для її досягнення.

## 2 РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГЗІТУ

### 2.1 Визначення характеристик плинугаза в торцевому зазорі

При дослідженні робочого процесу в торцевому ущільненні із саморегулювальним зазором прийнято використовувати наступні припущення [1, 2, 21 – 23]:

- плин (течія) газу в торцевому зазорі усталений, дозвуковий;
- ущільнювальні поверхні кілець утворюють плоский торцевий зазор;
- тиск у замкнених камерах наростає й убиває в часі за лінійним законом;
- плин затворного газу в торцевому зазорі напірний, радіальний й осесиметричний, тобто в окружному напрямку тиск не змінюється;
- малі високочастотні (із частотою  $\omega \cdot z$ , де  $z$  – число камер) осьові коливання аксиально-рухомого (рухомого в осьовому напрямку) кільця не враховуються;
- сили тертя у вторинному ущільненні (гумових прокладках і кільцях) незначні, тому у розрахунках їми нехтують.

Для визначення тиску затворного газу в замкнених камерах розглядається баланс масових витрат газу через кільцеву ділянку торцевого зазору ущільнення із центральним кутом  $\alpha_k$ , рівним кутовій довжині замкненої камери (рисунки 2.1, 2.2).

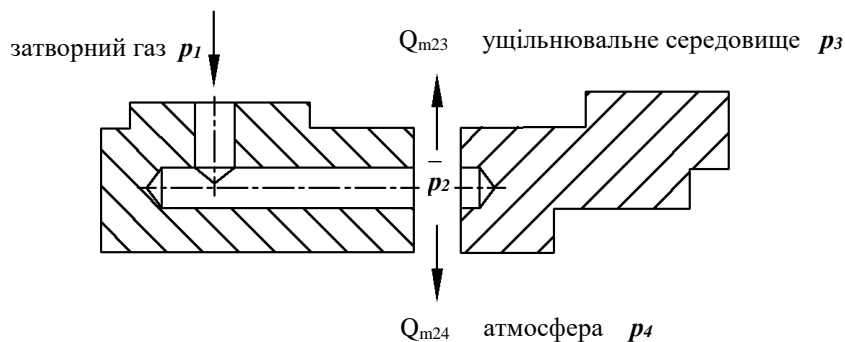


Рисунок 2.1 – Схема плинугаза в ГЗІТУ



При роботі ущільнення затворний газ попадає в камеру тільки при сполученні її з живильним каналом, тому баланс витрат газу з камери в порожнину компресора й в атмосферу буде визначатися виразом:

$$Q_{m12} t_2 = Q_{m23} (T - t_2) + Q_{m24} (T - t_2), \quad (2.1)$$

де  $Q_{m23}$  – масова витрата затворного газу з камери в порожнину компресора через зовнішній торцевий дросель із центральним кутом  $\alpha_k$ , який обмежений радіусами  $r_3$  та  $r_{23}$ , за час  $T - t_2$ ;  $Q_{m24}$  – масова витрата затворного газу з камери в навколишнє середовище через внутрішній торцевий дросель із кутом  $\alpha_k$  і радіусами  $r_{24}$  та  $r_4$  за час  $T - t_2$ ;  $Q_{m12}$  – витрата на стискання газу в замкненій камері під час запитки (упорскування газу з живильного каналу в камеру) за час  $t_2$ ;  $T$  – час між двома послідовними сполученнями камери з живильним каналом;  $t_2$  – час, протягом якого камера з'єднана з живильним каналом (час запитки камери затворним газом);  $T - t_2$  – період між запитками камери.

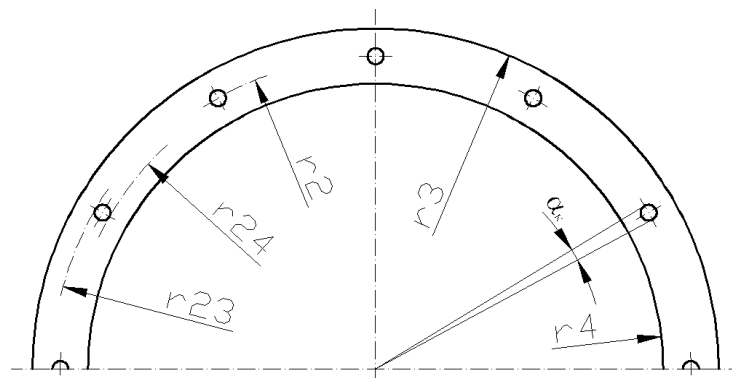


Рисунок 2.2 – Геометричні розміри, що використовуються в розрахунках (ущільнювальне кільце з камерами)

Витрата на стискання газу в замкненій камері визначається наступною залежністю:

$$Q_{m3} = \frac{V_k}{RT^o} \frac{(p_{2\max} - p_{2\min})}{t_2},$$

де  $V_k$  – об'єм замкненої камери;  $p_{2\max}$  і  $p_{2\min}$  – відповідно максимальне й мінімальне значення тиску в камері.

Періоди часу визначаються в такий спосіб:

$$T = \frac{2\pi}{\omega i}$$

$$t_2 = \frac{\alpha_k + 2\alpha_p}{\omega}$$

де  $\alpha_p$  – центральний кут живильного каналу;  $i$  – кількість живильних каналів.

Згідно з методикою розрахунків незатворних імпульсних ущільнень на рідинному змащенні [1, 21 – 23], рівняння балансу витрат (2.1) записується через провідності каналів подачі затворного газу:

$$g_{m12} (p_1 - \bar{p}_2) = g_{m23} (\bar{p}_2^2 - p_3^2) + g_{m24} (\bar{p}_2^2 - p_4^2), \quad (2.2)$$

де  $p_1$  – тиск затворного газу на вході в ущільнення;  $\bar{p}_2$  – осереднений за час між двома запитками тиск затворного газу в замкненій камері;  $p_3$  – тиск ущільнювального середовища;  $p_4$  – тиск навколишнього середовища за ущільненням (зазвичай атмосферне);  $g_{m23}$  і  $g_{m24}$  – провідності відповідно зовнішнього й внутрішнього торцевих дроселів (ділянок зазору, обмежених радіусами  $r_3$  й  $r_{23}$  і радіусами  $r_4$  й  $r_{24}$ );  $g_{m12}$  – «провідність» камери.

Формули для розрахунків провідностей мають вигляд:

$$g_{m23} = \frac{\alpha_k x^3}{24\mu RT^o \ln\left(\frac{r_3}{r_{23}}\right)} \left(1 - \frac{t_2}{T}\right),$$

$$g_{m24} = \frac{\alpha_k x^3}{24\mu RT^o \ln\left(\frac{r_{24}}{r_4}\right)} \cdot \left(1 - \frac{t_2}{T}\right),$$

$$g_{m12} = \frac{2V_k}{RT^o T}.$$

Виражаючи провідності через базові величини, можна записати:

$$g_{m23} = g_{m23b} u^3,$$

$$g_{m24} = g_{m24b} u^3,$$

$$g_{m12} = g_{m12b} \Omega = \frac{2V_k}{RT^o T_b p_b} \Omega.$$

Тут  $u = \frac{x}{x_b}$  – безрозмірний торцевий зазор;  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_b}$  – безрозмірна кутова швидкість обертання. У якості базових приймаються: величина торцевого зазору  $x = x_b$ , тиску затворного середовища  $p_1 = p_b$ , кутової швидкості  $\omega = \omega_b$  на номінальному режимі роботи ущільнення.

Щоб замкнути отриману систему рівнянь необхідно визначити осереднений за час між запитками камери  $T - t_2$  тиск газу в камерах  $\bar{p}_2$ . Для цього послу поділу правої й лівої частини на базові величини –  $x_b, p_b, \omega_b$  і базову провідність  $g_{m12b}$  – рівняння балансу витрат (2.2) записується в безрозмірному вигляді:

$$\Omega(\psi_1 - \psi_2) = \frac{g_{m23b}}{g_{m12b}} u^3 (\psi_2^2 - \psi_3^2) + \frac{g_{m24b}}{g_{m12b}} u^3 (\psi_2^2 - \psi_4^2), \quad (2.3)$$

де  $\psi_1 = \frac{P_1}{P_b}$ ,  $\psi_2 = \frac{\bar{P}_2}{P_b}$ ,  $\psi_3 = \frac{P_3}{P_b}$ ,  $\psi_4 = \frac{P_4}{P_b}$  – безрозмірні тиски затворного

середовища, у камерах, у ущільнювальній порожнині компресора і за ущільненням відповідно.

Беручи до уваги, що

$$G_m = \frac{g_{m23b}}{g_{m12b}} + \frac{g_{m24b}}{g_{m12b}},$$

з рівняння (2.3) можна знайти статичну характеристику ущільнення, тобто залежність торцевого зазору  $u$  від тиску затворного газу  $\psi_1$ , тиску ущільнювального середовища  $\psi_3$  і частоти обертання  $\Omega$ :

$$u = \left[ \frac{\Omega(\psi_1 - \psi_2)}{\psi_2^2 G_m - E_m} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (2.4)$$

$$\text{де } E_m = \psi_3^2 \frac{g_{m23b}}{g_{m12b}} + \psi_4^2 \frac{g_{m24b}}{g_{m12b}}.$$

Залежність безрозмірного осередненого тиску затворного газу в замкненій камері від зазору має вигляд:

$$\psi_2 = \frac{\left[ \Omega^2 + 4u^3 G_m (u^3 E_m + \Omega \psi_1) \right]^{\frac{1}{2}} - \Omega}{2u^3 G_m}.$$

## 2.2 Визначення діючих в зазорі сил

Для побудови статичної характеристики ущільнення необхідно у вираз (2.4) підставити тиск у камерах  $\psi_2$ , який у свою чергу залежить від навантаження на аксиально-рухоме кільце й розподілу тиску в торцевому зазорі. Для визначення невідомого тиску записується умова рівноваги аксиально-рухомого кільця ущільнення під дією осьових сил (рисунок 2.3):

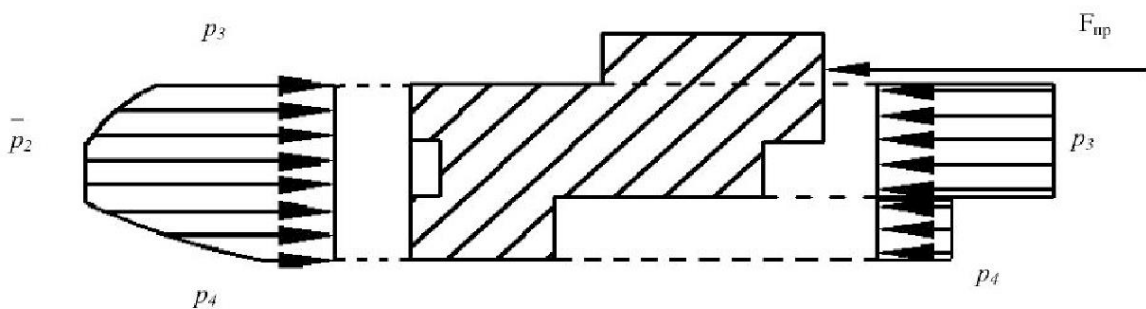


Рисунок 2.3 – Схема навантаження рухомого в осьовому напрямку кільця

$$F_c = F_s,$$

$$F_c = p_3 S_{35} + p_4 S_{54} + F_{pr},$$

де  $F_c$  – сила, що діє на тильну поверхню аксиально-рухомого кільця (закриваюча торцевий зазор);  $F_s$  – сила, що діє на ущільнювальний пасок аксиально-рухомого кільця (розкриває торцевий зазор);  $F_{pr}$  – зусилля попереднього стискання пружин,  $S_{35}$ ,  $S_{54}$  – площі дії тисків, які визначаються по формулах:

$$S_{35} = \pi(r_3^2 - r_5^2),$$

$$S_{54} = \pi(r_5^2 - r_4^2).$$

Тут  $r_5$  – радіус розміщення вторинного гумового ущільнення.

На відміну від лінійної епюри тиску рідини епюра тиску газу в плоскому зазорі має опуклу форму. Закон розподілу тиску газу по радіусу ущільнюючого паска визначається шляхом інтегрування одномірного рівняння Рейнольдса для газового змащення [24 – 27]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r x^3 \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0.$$

Для ізотермічного  $\frac{p}{\rho} = const$  напірного плинну газу

$$p(r) = \sqrt{p_{in}^2 - (p_{in}^2 - p_{out}^2) \left( \frac{\ln(r/r_{in})}{\ln(r_{out}/r_{in})} \right)}, \quad (2.5)$$

де  $p_{in}, p_{out}$  – тиск на вході й виході з торцевого зазору відповідно;  $r_{in}, r_{out}$  – радіус на вході й виході з торцевого зазору.

Як і в [1], у подальших розрахунках приймається, що тиск, що діє на ділянці зазору між камерами, майже збігається з осередненим тиском у камері й при обчисленні сили  $F_s$  можна прийняти на торцевому паску, обмеженому  $r_{23}$  й  $r_{24}$ , тиск постійним по окружності й рівним  $\bar{p}_2$ .

Сили, що діють на зовнішній і внутрішній кільцеві паски, обмежені радіусами  $r_3, r_{23}, r_{24}, r_4$ , визначаються шляхом інтегрування вираження (2.5) при відповідних граничних умовах

$$F_{23} = \frac{2 (\bar{p}_2^3 - p_3^3)}{3 (\bar{p}_2^2 - p_3^2)} S_{23},$$

$$F_{22} = \bar{p}_2 S_{22}, \quad (2.6)$$

$$F_{24} = \frac{2(\bar{p}_2^3 - p_4^3)}{3(\bar{p}_2^2 - p_4^2)} S_{24},$$

де

$$S_{22} = \pi(r_{23}^2 - r_{24}^2),$$

$$S_{23} = \pi(r_3^2 - r_{23}^2),$$

$$S_{24} = \pi(r_{24}^2 - r_4^2).$$

З урахуванням (2.6) вираз для балансу сил в торцевому зазорі в безрозмірному вигляді запишеться так:

$$\varphi_s = \frac{F_s}{p_b S_b} = \frac{2\psi_2^3 - \psi_3^3}{3\psi_2^2 - \psi_3^2} \frac{S_{23}}{S_b} + \psi_2 \frac{S_{22}}{S_b} + \frac{2\psi_2^3 - \psi_4^3}{3\psi_2^2 - \psi_4^2} \frac{S_{24}}{S_b}. \quad (2.7)$$

Рівняння рівноваги аксиально-рухомого кільця в безрозмірному виді:

$$\psi_3 \frac{S_{35}}{S_b} + \psi_4 \frac{S_{54}}{S_b} + \lambda = \frac{2\psi_2^3 - \psi_3^3}{3\psi_2^2 - \psi_3^2} \frac{S_{23}}{S_b} + \psi_2 \frac{S_{22}}{S_b} + \frac{2\psi_2^3 - \psi_4^3}{3\psi_2^2 - \psi_4^2} \frac{S_{24}}{S_b}, \quad (2.8)$$

де  $S_b$  – базова площа й  $\lambda$  – безрозмірне зусилля попереднього стиснення пружин, які визначаються в такий спосіб:

$$S_b = 0,5S_{23} + S_{22} + 0,5S_{24},$$

$$\lambda = \frac{F_{pr}}{S_b p_b}.$$

Так як одержати аналітичний розв'язок вираза (2.8) досить складно, він розв'язується чисельно відносно осередненого тиску в камерах  $\psi_2$ . Після цього, підставляючи його в рівняння (2.4), можна знайти статичну характеристику газозатворного ущільнення.

Затворний газ надходить в ущільнення тільки через живильні канали, тому масова витрата газу через ущільнення за один оборот вала визначається по формулі:

$$Q_m = z i (Q_{m13} t_1 + Q_{m14} t_1 + Q_{m12} t_2),$$

де

$$Q_{m13} = \frac{\alpha_p (x_b u)^3}{24 \mu R T^o \ln \frac{r_3}{r_{13}}} (p_1^2 - p_3^2),$$

$$Q_{m14} = \frac{\alpha_p (x_b u)^3}{24 \mu R T^o \ln \frac{r_{14}}{r_4}} (p_1^2 - p_4^2).$$

Тут  $Q_{m13}$  і  $Q_{m14}$  – витрата газу через один живильний канал на межкамерному проміжку в ущільнювальну порожнину й в атмосферу відповідно;  $t_1 = \frac{\alpha_m}{\omega}$  – час, протягом якого живильний канал проходить межкамерний проміжок з кутом

$$\alpha_m = \frac{2\pi - z \alpha_k}{z} - \alpha_p.$$



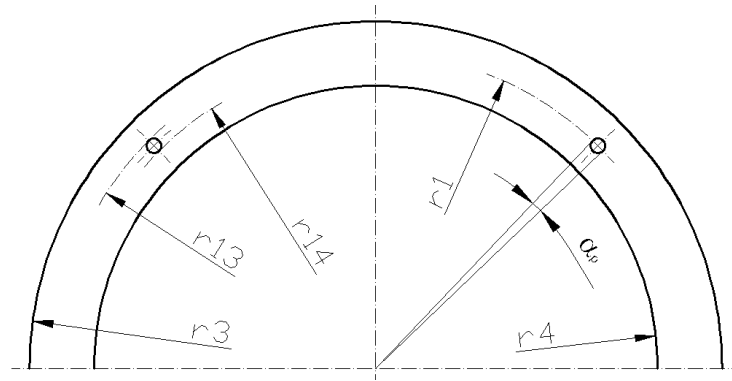


Рисунок 2.4 – Геометричні розміри, що використовуються в розрахунках (ущільнювальне кільце з живильними каналами)

Діаметр живильного каналу (його провідність) вибирається таким, щоб забезпечувати повну запитку камери затворним газом за час  $t_2$ .

Об'ємна витрата затворного газу через ущільнення за хвилину (у Нл/хв):

$$Q = \frac{n Q_m}{\rho} \cdot 10^3,$$

де  $n$  – швидкість обертання вала, об/хв.

Жорсткість газової плівки в торцевому зазорі є найважливішою характеристикою ущільнення, що визначає його надійність, тобто стабільність величини торцевого зазору при зміні умов експлуатації або непрогнозованих зовнішніх впливах на ущільнення (рух ротора в осьовому напрямку при зношуванні підшипників та ін.). Безрозмірний коефіцієнт статичної жорсткості газозатворного торцевого ущільнення знаходиться шляхом диференціювання виразу (2.7) по безрозмірному зазору:

$$-\chi_s = \frac{\partial \varphi_s}{\partial u}. \quad (2.9)$$

Так як вираз для безрозмірного зусилля  $\varphi_s$ , що розкриває торцевий зазор, має складний вигляд він диференціюється чисельно.

Умовою статичної стійкості ущільнення є наявність негативного зворотного зв'язку між регульованою величиною (торцевим зазором) і зовнішніми впливами (тиском середовища, що ущільнюється, зусиллям стискання пружин), тому область статичної стійкості ущільнення визначається з умови:

$$\chi_s < 0.$$

### 2.3 Висновки

1. Розглянутий режим плин у газу в плоскому зазорі, утвореному ущільнювальними поверхнями торцевих кілець. У межах робочого діапазону швидкостей, температур і тисків плин газу в зазорі ущільнення з великою вірогідністю можна вважати суцільним, ламінарним, ізотермічним і безінерційним.

2. На основі моделі робочого процесу імпульсного ущільнення традиційної конструкції побудована фізична модель ГзІТУ.

3. На базі фізичної моделі, закону збереження речовини й умови рівноваги тіл під дією прикладених сил розроблена математична модель ГзІТУ. З її допомогою можна визначати статичну характеристику ущільнення, знаходити величину витрати затворного газу й осереднений тиск газу в робочому зазорі в зоні розташування камер і живильних каналів, аналізувати жорсткість плівки газу в торцевому зазорі.

### 3 РОЗРОБКА ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ГЗІТУ

При знаходженні сили, що розкриває, зазор в рівняннях (2.6) і (2.8) вважається, що тиск затворного середовища на ділянці торцевого зазору, обмеженого радіусами  $r_{k2}$  й  $r_{k1}$ , в окружному напрямку практично не змінюється й рівний осередненому в часі тиску  $\overline{p_2}$ . Як показують дослідження незатворного ИТУ на рідинному змащенні тиск у камерах між суміжними упорскуваннями середовища, що ущільнюється, практично не змінюється [1]. У випадках же, коли навантаження на рухоме в осьовому напрямку ущільнювальне кільце з боку середовища, що ущільнюється, навмисно зменшене, тиск у камерах із часом падає й може досягтися значень у рази менших чим тиск ущільнювального середовища [1].

Накопичені дані експлуатації показують, що в ГЗІТУ на ділянці зазору між камерами за певних умов експлуатації значення тиску затворного газу в камерах і між камерами можуть у кілька разів відрізнятись. Тому, у прийнятій математичній моделі ГЗІТУ слід відмовитися від допущення про рівність тиску в камерах і в проміжку між камерами середньому значенню  $\overline{p_2}$  й ввести в неї розрахунок величини тиску в окружному напрямку. Таким чином, для уточнення математичної моделі потрібно обчислити розподіл поля тиску в зазорі, тобто знайти розв'язок завдання про рух затворного газу в торцевому зазорі ГЗІТУ.

#### 3.1 Чисельний метод визначення тиску в торцевому зазорі

З теорії гідродинамічного змащення широко відоме рівняння Рейнольдса для визначення тиску в тонкому шарі газу, що перебуває між двома поверхнями, що переміщуються друг відносно друга. Це рівняння зв'язує функцію тиску  $p(x, z)$  з товщиною шару газу  $h$ , його в'язкістю  $\mu$ , щільністю  $\rho$  й швидкістю руху однієї з поверхонь, що обмежують газовий шар  $U$  [24 – 27]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \frac{\partial(phU)}{\partial x} + 12\mu \frac{\partial(ph)}{\partial t}. \quad (3.1)$$

Наведене рівняння часто застосовують для розрахунків характеристик підшипників (плоских, циліндричних, конічних, кульових) і розрахунків ущільнень (газостатичних і газодинамічних) [28], тому воно покладене в основу подальших досліджень ГЗІТУ. Його розв'язок дозволить знайти розподіл тиску в торцевому зазорі. При цьому умови плинущу газу в зазорі ущільнення, використовувани при побудові моделі робочого процесу, задовольняють основним допущенням, прийнятим при виводі рівняння (3.1).

Через нелінійність цього рівняння його аналітичне інтегрування в загальному виді на сьогоднішній день не представляється можливим. На практиці вдається одержати замкнені розв'язки, але лише ціною численних спрощуючих гіпотез, а при розрахунках характеристик доводиться прибїгати до чисельних методів інтегрування рівняння за допомогою комп'ютера. Усі вони засновані на перетворенні рівняння (3.1) у залежність із кінцевими різницями, розв'язувану методом послідовних ітерацій. Методи схожі між собою й різняться тільки граничними умовами, які визначаються для кожного конкретного випадку.

Широке поширення одержав метод Раймонди [29], який є найбільш точним, але висуває високі вимоги до способів дискретизації областей розв'язку й формам побудови похідних, що відбивається на збіжності різницевих рівнянь [30]. Тому наявні в літературі номограми для визначення несучої здатності шару газового змащення призначені в основному для опорних підшипників і тільки для окремих значень ексцентриситетів і відносних довжин шипу й вкладиша.

У більшості випадків при дослідженні робочих процесів газодинамічних вузлів розглядається стаціонарне одомірне рівняння газового змащення тобто напірним або зсувним плином змащувального середовища знехтують [21 – 23, 29, 30]. У цьому випадку рівняння (3.1) приймає вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\mu \frac{\partial(phU)}{\partial x}. \quad (3.2)$$

Для газостатичних вузлів права частина рівняння (3.2) дорівнює нулю:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.2) і (3.3) мають аналітичні розв'язки для простих граничних умов, за допомогою яких часто розраховують основні характеристики вузлів ковзання. Однак у ряді випадків результати, отримані за допомогою такого спрощеного рівняння Рейнольдса, є недостатньо точними. У роботі розглянутий розв'язок рівняння Рейнольдса, виконаний сучасним чисельним методом граничних елементів. Цей метод досить простий у реалізації й не пред'являє вимог до вибору способу дискретизації розрахункової області.

Виразивши  $\rho = p^\kappa$  ( $\kappa$  – показник політропи) і поклавши в першому наближенні, що режим плинину газу в зазорі згодом не змінюється ( $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ ), можна переписати (3.1) у вигляді [21 – 23]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p^{\left(1+\frac{1}{\kappa}\right)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p^{\left(1+\frac{1}{\kappa}\right)}}{\partial z} \right) = 6\mu \left( \frac{1}{\kappa} + 1 \right) \frac{\partial}{\partial x} \left( U p^{\frac{1}{\kappa}} h \right). \quad (4.4)$$

Рівняння (3.4) являє собою рівняння Пуассона. Для знаходження його розв'язку можна скористатися наступним методом: знайти розв'язок (3.1) без правої частини (у вигляді рівняння Лапласа), а потім із знайденого загального розв'язку, відняти частковий розв'язок (праву частину), що не залежить від граничних умов.

Привести (3.1) до рівняння Лапласа можна, допустивши, що режим плинину газу в торцевому зазорі тільки радіальний, тобто обумовлений перепадом тиску між зовнішніми й внутрішніми радіусами торцевого зазору. Тоді, після введення

підстановки  $P = p^{1+\frac{1}{\kappa}}$ , що враховує зміну щільності затворного газу при зміні тиску (стискальність середовища), рівняння (3.4) перепишеться у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0. \quad (3.5)$$

Невідомими величинами в цьому рівнянні є шукана функція  $P$  й величина торцевого зазору  $h$ . Величина зазору є функцією координат: в окружному напрямку характеризується перекосом торцевих кілець, у радіальному – їхнім коробленням (поворотом перерізів) під дією тисків. Повороти перерізів ущільнювальних кілець під дією тиску, радіальних і осьових сил можна визначити, скориставшись відомою теорією осесиметричних деформацій Біцено [2]. У ній параметрами є геометричні розміри торцевих кілець ущільнення, величини максимальних тисків і зусилля стискання пружин. Знайдені в результаті розрахунків значення, кутів повороту кілець (порядку  $10^{-4}$  рад), і відхилення від площинності ущільнювальних поверхонь (порядку 1,5 – 2,5 мкм) показують, що при робочих величинах торцевого зазору (10 – 20 мкм) впливом деформацій кілець можна знехтувати. Таким чином, є всі підстави вважати в першому наближенні, що  $h$  в окружному й радіальному напрямках змінюється мало й цією зміною можна знехтувати. Тоді вираз (3.5) прийме вид рівняння Лапласа відносно тільки шуканої функції тиску  $P$ :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (3.6)$$

Використовуваний для розв'язку (3.4) метод граничних елементів у цей час здобуває усе більш широке поширення й використовується в задачах механіки суцільних середовищ [31 – 34]. Суть цього методу полягає у зведенні крайової задачі для диференціального рівняння (3.6) у часткових похідних до інтегрального рівняння по границі досліджуваної області, яке можна отримати

застосуванням до шуканої функції формул Гріна. У загальному виді інтегральне рівняння для області із границею  $\Gamma$  має вигляд [31]:

$$c(\xi)P(\xi) + \int_{\Gamma} P(x) q^*(\xi, x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} q(x) P^*(\xi, x) d\Gamma(x). \quad (3.7)$$

Тут  $\xi$  – довільна точка на границі області,  $c(\xi)$  – функція, що враховує особливості, що виникають при інтегруванні по границі області,

$P^*(\xi, x) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}$  – фундаментальний розв'язок рівняння Лапласа для двовимірного випадку,  $r$  – відстань між точками  $\xi$  й  $x$  на границі області,

$$q^*(\xi, x) = \frac{\partial P^*(\xi, x)}{\partial n(x)}.$$

Розв'язок рівняння (3.7) здійснюється за допомогою розбивки границі області на ділянки (елементи), інтегрування по яких виконується чисельно методом механічних квадратур Гауса. Потім отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь розв'язується методом Гауса. У результаті визначаються

невідомі значення функції  $P$  й  $\frac{\partial P}{\partial n}$  на границі, знаючи які можна знайти значення

функції тиску в кожній  $i$ -ой точці усередині області, оточеної границею  $\Gamma$ :

$$P_i = \int_{\Gamma} q P^* d\Gamma - \int_{\Gamma} P q^* d\Gamma.$$

У порівнянні з методом кінцевих різниць розв'язок поставленої задачі менш громіздкий, тому що для визначення поля тисків в області потрібно дискретизувати тільки границю, а не саму область, що набагато простіше. Цей метод добре працює при наявності криволінійних границь, а точність розв'язку мало залежить від частоти дискретизації границі і є високою навіть при розбивці на великі елементи [31].

У якості області для визначення поля тиску середовищ обрана ділянка торцевого зазору ГЗІТУ, яка обмежена зовнішнім і внутрішнім радіусами ущільнювальних кілець і радіальними січними, які проходять через середини сусідніх камер (рисунок 3.1). У якості граничних умов задається функція тиску: на зовнішньому радіусі – тиск, що ущільнюється  $P_3$ , на внутрішньому – тиск навколишнього середовища  $P_4$ , у зонах живильних каналів – тиск затворного газу  $P_2$ , по радіусу – значення тиску, який змінюється за квадратичним законом (ізотермічний плин газу).

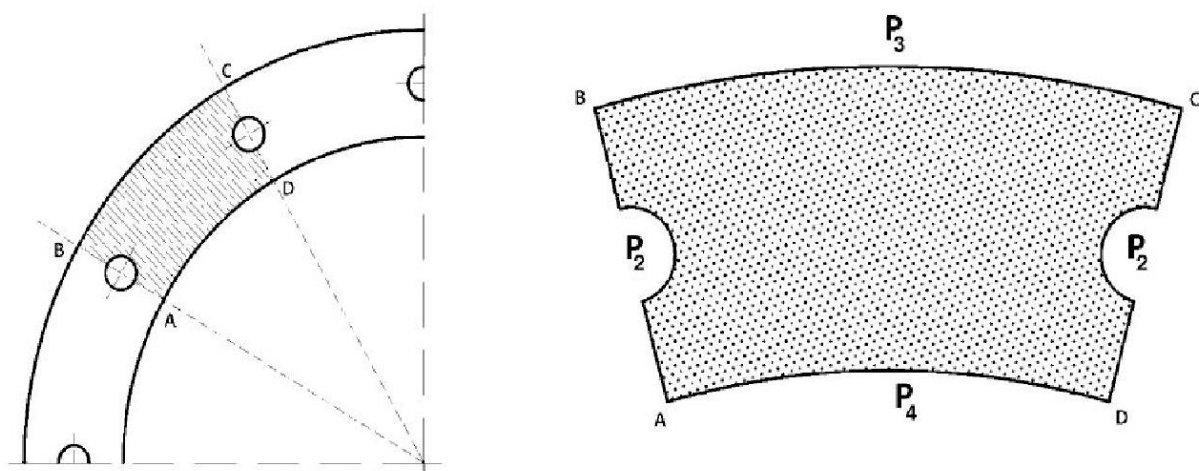


Рисунок 3.1 – Виділення контуру для дослідження поля тиску в торцевому зазорі між камерами ущільнення й завдання на ньому граничних умов

Інтегральному рівнянню (3.7) надається дискретна форма, шляхом запису його для ряду елементів. Для розв'язка використовуються так звані «постійні» елементи, які характеризуються тим, що:

- а). по довжині кожного елемента значення шуканої функції задається постійним;
- б). точки, у яких розглядається значення шуканої функції (вузли), розташовуються в середині кожного елемента.

Границя розбивається на  $N$  елементів, на кожному з яких задаються значення тиску (граничні умови типу Дирихле). На рисунку 3.2 показаний контур розглянутої області, розбитий на елементи.



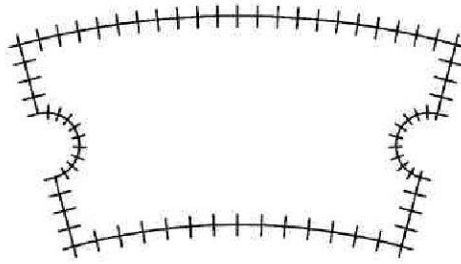


Рисунок 3.2 – Розбивка контуру досліджуваної області на окремі елементи

У цьому випадку (3.7) можна записати так:

$$c_i P_i + \int_{\Gamma} P q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} q P^* d\Gamma.$$

Так як розглядається рівняння Лапласа для плоского завдання та при розбивці границі використовуються постійні елементи, то  $P^* = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}$  й  $c_j = 1/2$ . Необхідно відзначити, що тут  $\xi$  береться в якості точки  $i$ , для якої існує фундаментальний розв'язок  $P(\xi) = P_i$ . Для спрощення тут опущені символи в дужках  $\xi$  й  $x$ . Дискретна форма рівняння приймає вигляд:

$$\frac{1}{2} P_i + \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma \right) P u_j = \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} P^* d\Gamma \right) q_j, \quad (3.8)$$

де  $\Gamma_j$  – довжина  $j$ -го елемента.

Інтеграли  $\int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma$  встановлюють зв'язок між  $i$ -м вузлом і  $j$ -м елементом,

по довжині якого береться інтеграл, і надалі в тексті будуть позначатися  $\hat{H}_{ij}$ .

Аналогічно інтеграли виду  $\int_{\Gamma_j} P^* d\Gamma$  далі будуть позначатися  $G_{ij}$ . Увівши

позначення:

$$\hat{H}_{ij} = \begin{cases} \hat{H}_{ij}, & i \neq j \\ \hat{H}_{ij} + 1/2, & i = j \end{cases}, \quad (3.9)$$

рівняння (3.8) можна записати у вигляді:

$$\sum_{j=1}^N H_{ij} P_j = \sum_{j=1}^N G_{ij} q_j.$$

Повна система рівнянь переписується в матричній формі:

$$HP = GQ.$$

Інтеграли  $\hat{H}_{ij}$  й  $G_{ij}$  обчислюються з використанням для елементів квадратурних формул Гауса (за винятком того елемента, якому відповідає розглянутий вузол  $i$  для якого  $\hat{H}_{ij} \equiv 0$  й  $G_{ij} = \frac{1}{\pi} \left| \frac{l}{2} \right| \left( \ln \frac{1}{|l/2|} + 1 \right)$  (тут  $l$  – довжина елемента)).

Зв'язок між внутрішньою точкою  $i$  й значеннями  $P$  й  $q$  на границі області задається співвідношенням:

$$P_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} q_j - \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} P_j. \quad (3.10)$$

Застосовуючи (3.10) до всієї досліджуваної області із заданим кроком вибору внутрішніх точок можна одержати масив значень, що задовольняють рівнянню (3.6).

Знаходження правої частини  $W(x) = 6\mu \left( \frac{1}{\kappa} + 1 \right) \frac{\partial}{\partial x} \left( Up^{\frac{1}{\kappa}} h \right)$  рівняння (3.4)

одночасно з (3.5) є досить важкою задачею. Однак, її можна розв'язати шляхом

послідовних ітерацій [35], підставляючи знайдене з (3.5) значення похідної  $\frac{\partial P}{\partial x}$  в інтегральне рівняння (3.7) у вигляді

$$\int_{\Omega} W(x) P^*(\xi, x) d\Omega(x) \quad (3.11)$$

Тут  $W(x)$  береться в окремих точках області. Похідна  $\frac{\partial P}{\partial x}$  легко визначається по залежності [31]:

$$\frac{\partial P(\xi)}{\partial x_i(\xi)} = c(\xi) \left\{ \int_{\Gamma} q(x) \frac{\partial P^*(\xi, x)}{\partial x_i(\xi)} d\Gamma(x) - \int_{\Gamma} P(x) \frac{\partial q^*(\xi, x)}{\partial x_i(\xi)} d\Gamma(x) \right\}$$

або з використанням формул кінцевих різниць [35]:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_i = \frac{P_{i-1} - P_{i+1}}{\Delta},$$

де  $P_{i-1}$  й  $P_{i+1}$  – значення тиску в точках  $x_{i-1}$  і  $x_{i+1}$  в околиці точки  $x_i$ ,  $\Delta$  – відстань між точками  $x_{i-1}$  й  $x_{i+1}$ .

Тепер для обчислення інтеграла (4.10) можна розбити всю область на окремі комірки й скористатися чисельним інтегруванням по них (рисунок 3.3).

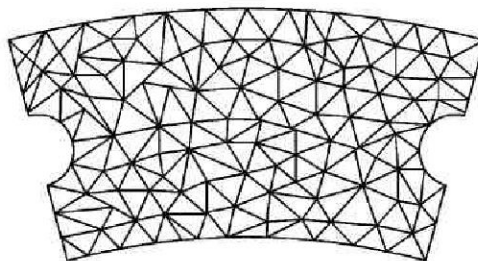


Рисунок 3.3 – Розбивка досліджуваної області на комірки

Повну систему рівнянь для  $N$  вузлів в матричній формі:

$$B + HP = GQ.$$

Після того як знайдені значення функцій  $P$  і  $q$  на всій границі, можна обчислити  $P$  в довільній внутрішній точці за допомогою виразу:

$$P_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} q_j - \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} P_j - B_i, \quad (3.12)$$

де  $B_i$  – чисельний розв’язок інтеграла (3.11) для кожного значення фундаментального розв’язку, заданого в  $i$ -м вузлі.

Застосовуючи (3.10) до всієї досліджуваної області із заданим кроком вибору внутрішніх точок одержують масив значень величини тиску у всьому секторі торцевого зазору імпульсного ущільнення.

### 3.2 Реалізація чисельного методу й моделювання поля тиску в зазорі

Аналіз отриманих у ході експериментальних досліджень даних, показує, при розрахунках характеристик ГзТУ необхідно враховувати, що на ділянці торцевого зазору між камерами тиск не завжди рівний тому самому осередненому тиску в камерах, і у випадку, коли відстань між камерами на поверхні ущільнювального кільця більше чим довжина самих камер, таке припущення приводить до зниження точності одержуваних теоретичних результатів розрахунків. З погляду застосування затворного ущільнення, ця обставина накладає обмеження на умови експлуатації, тому що при певних відстанях між камерами й комбінаціях тисків ущільнювального й затворного середовищ можливі прориви ущільнювального середовища, крізь межкамерні проміжки через неприпустиме, з точки зору запирання, падіння тиску затворного газу між камерами. Тому при проектуванні нового ущільнення необхідно розглядати нерівномірність тиску в окружному напрямку шляхом моделювання задачі плин

газу між торцевими поверхнями ущільнювальних кілець. Визначивши характер і величину зміни тиску в газовому шарі й діапазон герметичності ущільнення, приступають до знаходження характеристик ущільнення.

У якості вихідних даних для розрахунків використовуються робочі параметри (частота обертання ротора, тиск затворного й ущільнювального середовищ і тиск за ущільненням – атмосферний) і геометричні розміри ущільнювальних кілець. У першому наближенні розглядаються випадки такого взаємного розташування кілець, коли камери й живильники сполучені.

Контур кожного з ділянок зазору між живильниками розбивається на граничні елементи. На кожному з елементів задаються локальні значення тиску, властивості елемента й зв'язок даного елемента з іншими елементами. Для всіх елементів контуру будується матриця зв'язків, розв'язуючи яку одержують невідомі значення нормальної похідної функції тиску на границі  $q$ . На етапі складання матриці впливів у неї вводиться поправка на відносне переміщення ущільнювальних кілець. За значеннями функції тиску і її нормальної похідній на кожному граничному елементі, визначається значення тиску в будь-якій точці обраної ділянки зазору.

Для знаходження поправки в матриці впливу крім швидкості відносного переміщення ущільнювальних кілець і властивостей газу необхідно попередньо знайти похідну функції тиску усередині контуру в напрямку обертання кілець, тому процес обчислення тиску будують, використовуючи послідовні ітерації.

На кожному етапі обчислення усередині контуру визначається величина поправки з урахуванням результатів попередньої ітерації. У якості критерію для зупинки ітераційного процесу необхідно вибрати таку інтегральну величину, яка характеризує ступінь зміни шуканої функції відразу у всій області. У якості такої доцільно вибрати величину несучої здатності газового шару. Ітеративні обчислення виконуються циклічно доти, поки чергове значення отриманої несучої здатності не буде відрізнятися від попереднього менше, чим на 1 %. Величина торцевого зазору визначається з умови рівноваги аксиально-рухомого кільця під дією прикладених осьових сил. Обчислення проводяться зі зміною величини зазору, що задається, доти, поки еюра розподілу тиску в зазорі не буде



врівноважена діючим на ущільнювальне кільце навантаженням з боку пружин і ущільнювального тиску.

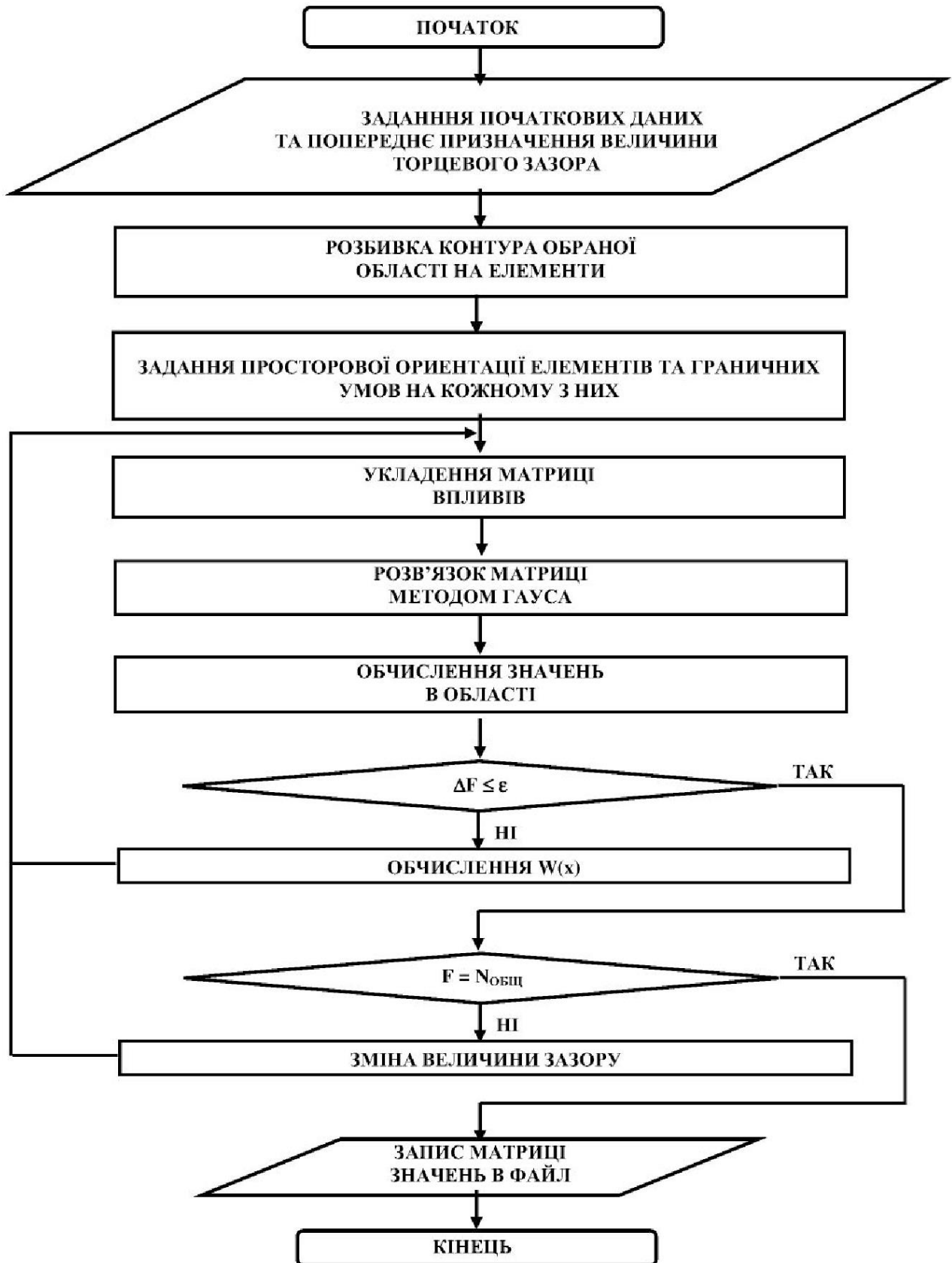


Рисунок 3.4 – Алгоритм чисельного знаходження тиску в торцевому зазорі ГзІТУ з використанням методу граничних елементів

Таким чином, виконуючи викладений підхід на кожному з межкамерних ділянок, укладених між двома сусідніми живильниками, визначаються шукані значення тиску в просторі зазору, що ущільнюється. Алгоритм цього чисельного підходу представлено на рисунку 3.4.

### 3.3 Висновки

У главі розглянуте створення й застосування чисельної розрахункової моделі для визначення характеристик ущільнення й чисельних досліджень впливу експлуатаційних параметрів (коливання частоти обертання ротора, тиску затворного середовища й величини зазору) на стійкість роботи ущільнення. Розроблений алгоритм дозволяє знайти епюру розподілу тиску в зазорі, а описаний ітераційний підхід дає можливість знаходити поле тиску при наперед невідомій величині торцевого зазору. Одержувані в результаті чисельного розв'язку рівняння Рейнольдса значення тиску дозволяють доповнити запропановану вище математичну модель робочого процесу шляхом обліку реального (а не осередненого) розподілу тиску в торцевому зазорі.

Результати проведених за допомогою чисельної моделі досліджень показують, що:

- отримана чисельна модель подібно реальному ущільненню, має властивість «саморегульованості» параметрів, що обчислюються, стосовно збурювань, що задаються вихідним параметрами (наприклад, коливанням тиску затворного середовища);

- запропонований алгоритм системи моделювання плинину газу в зазорі ущільнення дозволяє врахувати й оцінити окружні плинину газу в торцевому зазорі, що дозволяє, не прибігаючи до натурного експерименту досліджувати роботу ущільнення на штатних і позаштатних режимах експлуатації;

- візуалізація отриманого розподілу тиску дозволяє локалізувати місця можливого прориву середовища, що ущільнюється, через межкамерні проміжки торцевого зазору;



– отримана чисельна модель дозволяє оцінити розподіл тиску в зазорі й, відповідно, несучої здатності газового шару в моменти пусків і зупинок обертання ротора, а також вивчити ефективність традиційних способів підтримки в цих умовах заданої несучої здатності.

## 4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГЗІТУ

### 4.1 Розробка моделі САПР ГЗІТУ

Після вибору середовища й мови розробки САПР, виводу фізичної, аналітичної й чисельної моделей робочого процесу ГЗІТУ наступним необхідним етапом роботи є проектування моделі САПР. Вибір способу представлення проектованої моделі впав на методологію IDEF0 і UML-діаграму сценарію використання системи.

Сценарій використання містить у собі:

- опис взаємодії діючих осіб (людей та / або стороннього програмного забезпечення – «акторів») з розроблювальною системою;
- укрупнене представлення процесів усередині системи, які обмінюються з акторами потоками інформації;
- набір зовнішніх джерел забезпечення процесів системи.

Цей сценарій оформляється у вигляді діаграми, що допомагає систематизувати задачі проектованої системи й можливості взаємодії з нею.

Акторами САПР ГЗІТУ є:

- розроблювач (інженер-конструктор), який використовує систему по прямому призначенню.
- програмний продукт AutoCAD, який використовується в якості зовнішнього незалежного інструмента для обробки кінцевого продукту роботи системи – креслень елементів ГЗІТУ, виконаних у вигляді текстових файлів з командами креслення мовою AutoLisp.

Варіанти взаємодії із системою (її використання) включають:

- уведення початкових (вихідних) даних для старту проектування;
- керування розрахунками геометрії ущільнювальних кілець за результатами вивчення режиму герметичної роботи ГЗІТУ по визуалізованій моделі робочого процесу ущільнення;

– звірення спроектованих розмірів пружин і кріпильних гвинтів несучої втулки з набором доступних стандартних типових деталей із зовнішнього текстового файлу;

– побудова мовою проектування AutoLisp файлів із кресленнями спроектованих елементів ГЗІТУ;

– ініціювання запуску зовнішнього програмного продукту Autocad з наступною передачею в нього файлів із кресленнями на мові проектування AutoLisp.

Результат розробки сценарію взаємодії описаних елементів САПР наведений у вигляді діаграми (рисунок 4.1).

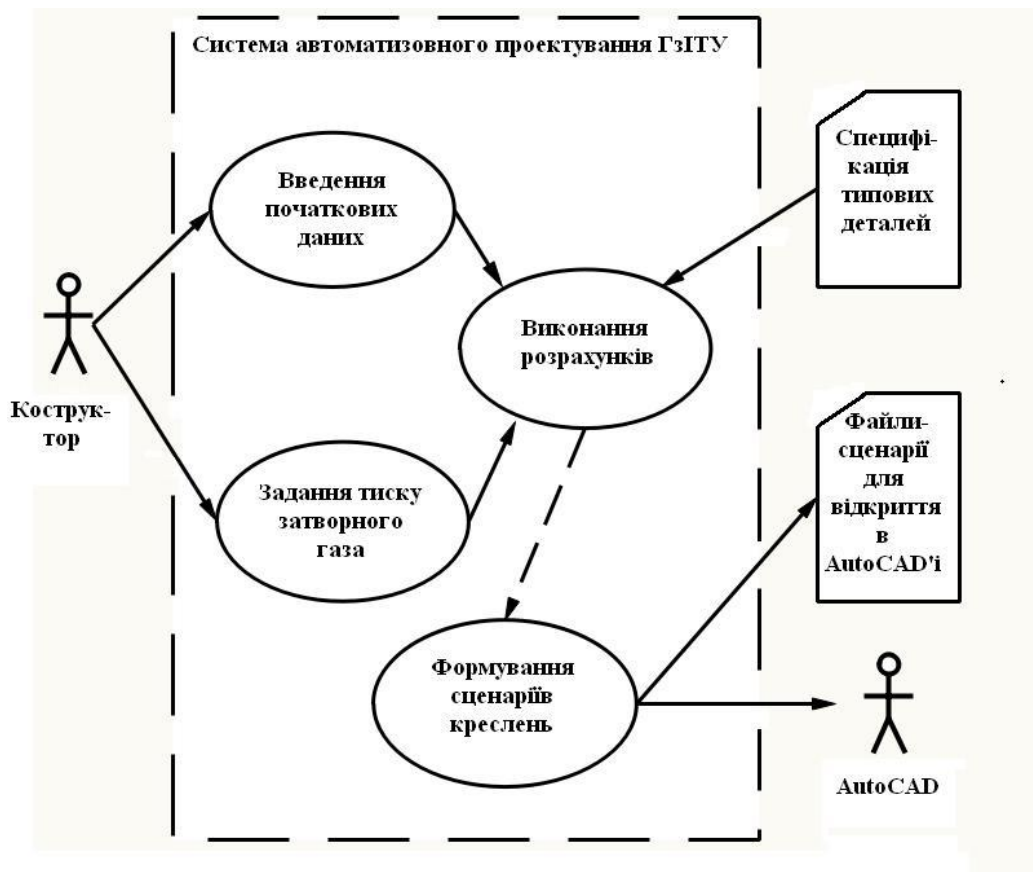


Рисунок 4.1 – Діаграма варіантів використання

Деталізований опис роботи САПР ГЗІТУ у вигляді інформаційних потоків, правил і механізмів їх обробки й перетворення вхідних даних у вихідні доцільно представляти у вигляді елементів методології IDEF0. Такий підхід дозволяє формалізувати й зробити наочними внутрішні процеси системи.

Основними інформаційними компонентами системи є:

– вхідні – початкові дані, що визначають завдання системи на етапі її ініціалізації;

– вихідні – дані, що є результатом роботи системи;

– керуючі – правила й інструкції обробки даних, а також обмеження, що регламентують їхню застосовність;

– виконуючі – набір інформаційних і неінформаційних компонентів, що забезпечують працездатність системи (включаючи апаратне забезпечення й працюючий з ним персонал);

– основний блок – власне проектована система.

Взаємодія цих компонентів зручно показати графічно у вигляді контекстної діаграми, що дає наочне представлення про устрій проектованої системи.

Для розробки САПР ГзІТУ перелік елементів діаграми одержав наступне виконання:

– вхідні – початкові дані для старту проєтування: параметри експлуатації ГзІТУ й розміри камери копресора для розміщення в ньому ущільнення;

– вихідні – результат проєтування: файли креслень елементів ГзІТУ, вимоги до зовнішньої системи забезпечення затворним газом, визуалізоване представлення робочого процесу ГзІТУ (плин робочих середовищ у торцевому зазорі ущільнення);

– керуючі – перетворення даних: математична й фізична моделі роботи ГзІТУ, що визначають розрахунки робочих параметрів ущільнення для подальших розрахунків геометрії ущільнювальних кілець, фізичні властивості використовуваних у роботі середовищ, а також перелік припустимих стандартом розмірів типових деталей – пружин і кріпильних гвинтів несучої втулки;

– виконуючі – забезпечення: середовище розробки САПР Blackbox Component Builder, персональний комп'ютер, розроблювач (інженер-конструктор).

Отримана контекстна діаграма А-0 процесу розробки ГзІТУ проектованої САПР наведена на рисунку 4.2.

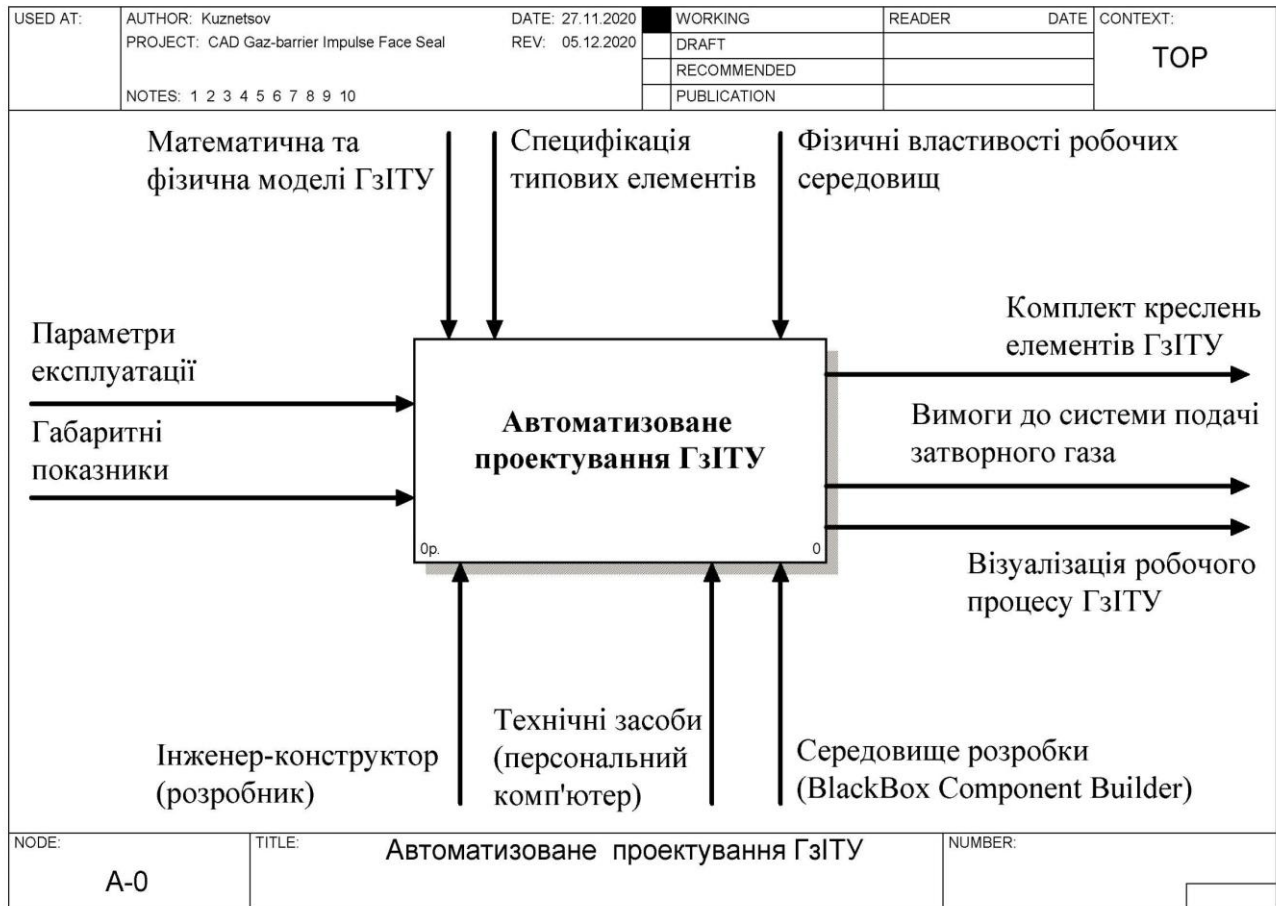


Рисунок 4.2 – Контекстна діаграма САПР ГЗІТУ (А-0)

На наступному етапі необхідно провести декомпозицію (розділення) представленої моделі на окремі функціонально відособлені частини, що виконують певні фрагменти роботи САПР. Взаємодія й послідовність включення цих частин у роботу також зручно представити у вигляді діаграми, подібної попередній.

Таким чином, проектована САПР функціонально ділиться на 5 взаємозалежних компонентів, що послідовно перетворюють вхідні дані у вихідні:

- визначення параметрів робочого процесу ГЗІТУ (параметрів плинину газу в торцевому зазорі);
- розрахунок фланця та несучої втулки (масштабування розмірів елементів базової конструкції);
- розрахунок геометрії ущільнювальних кілець ГЗІТУ (визначення геометричних розмірів торцевих поверхонь, кількість і розміри камер та живільних каналів на поверхнях);

– моделювання робочого процесу ГзіТУ та розрахунок пружин (чисельне розв'язання рівняння Рейнольдса, застосування його для всієї площин торцевого зазору та отримання візуалізації розподілу поля тиску на цій площині);

– створення файлів сценаріїв креслень (запис у файл команд будови ліній мовою Autolisp).

Результат декомпозиції A0 вихідної діаграми A-0 наведено на рисунку 4.3.

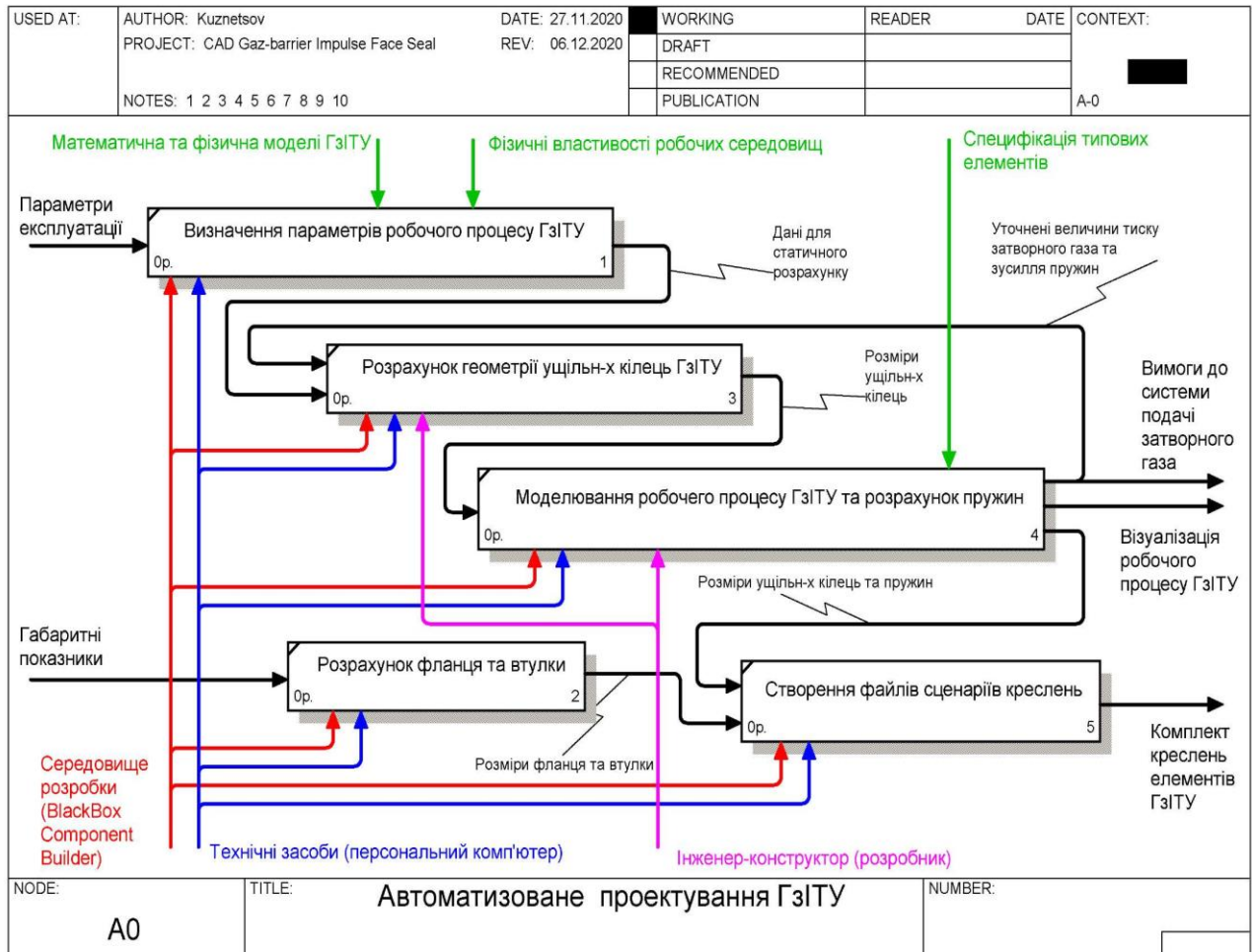


Рисунок 4.3 – Декомпозиція діаграми A-0

Порядок взаємодії компонентів при перетворенні даних на діаграмі показаний стрілками з підписами.

Таким чином, отримано повнофункціональний опис моделі проектованої САПР ГзіТУ, представлене трьома видами діаграм.

## 4.2 Реалізація моделі САПР

У процесі роботи САПР використовуються наступні величини вхідних і керуючих даних (таблиця 1):

Таблиця 1 – Вхідні й керуючі дані для розрахунків

Параметр	Одиниці	Позначення
Частота обертання ротора	<i>об/хв</i>	<i>n</i>
Тиск ущільнювального середовища	<i>Па</i>	<i>p<sub>з</sub></i>
Тиск затворного газу (попередній)	<i>Па</i>	<i>p<sub>1</sub></i>
Температура затворного середовища	<i>К</i>	<i>T<sup>о</sup></i>
Щільність затворного газу	<i>кг/м<sup>3</sup></i>	<i>ρ</i>
В'язкість затворного газу	<i>Па·с</i>	<i>μ</i>
Зусилля стискання пружин (попереднє)	<i>Н</i>	<i>F</i>
Радіус розміщення живильних каналів	<i>м</i>	<i>r<sub>1</sub></i>
Радіус розміщення камер	<i>м</i>	<i>r<sub>2</sub></i>
Діаметр камери компресора	<i>м</i>	<i>r<sub>3</sub></i>
Діаметр ротора під ущільненням	<i>м</i>	<i>r<sub>4</sub></i>
Кількість камер	<i>шт</i>	<i>z</i>
Кількість живильників	<i>шт</i>	<i>i</i>
Діаметр камер (попередній)	<i>м</i>	<i>d<sub>k</sub></i>
Діаметр живильних каналів (попередній)	<i>м</i>	<i>d<sub>p</sub></i>
Глибина камер (попередня)	<i>м</i>	<i>h<sub>k</sub></i>
Номінальний торцевий зазор	<i>м</i>	<i>x<sub>b</sub></i>

Розробка САПР здійснюється шляхом створення розрахункових модулів, з яких складаються окремі блоки (компоненти діаграми А-0), виконання яких відбувається в порядку, заданому діаграмою (малюнок 4.3). Кожний розрахунковий модуль (функціонально закінчений фрагмент алгоритму) розробляється в рамках єдиного компонентного каркаса системи Blackbox. Усі модулі, таким чином, стають функціональними елементами системи Blackbox, що

надалі дозволяє інженероу-розробнику не тільки втручатися «на лету» у хід автоматизованого проектування з метою модернізації системи або дослідження впливу даних на результати роботи алгоритмів, але й створювати локалізовані самостійні версії САПР із різним заданим функціоналом.

Згідно отриманій моделі САПР у системі створюються наступні модулі (рисунок 4.4):

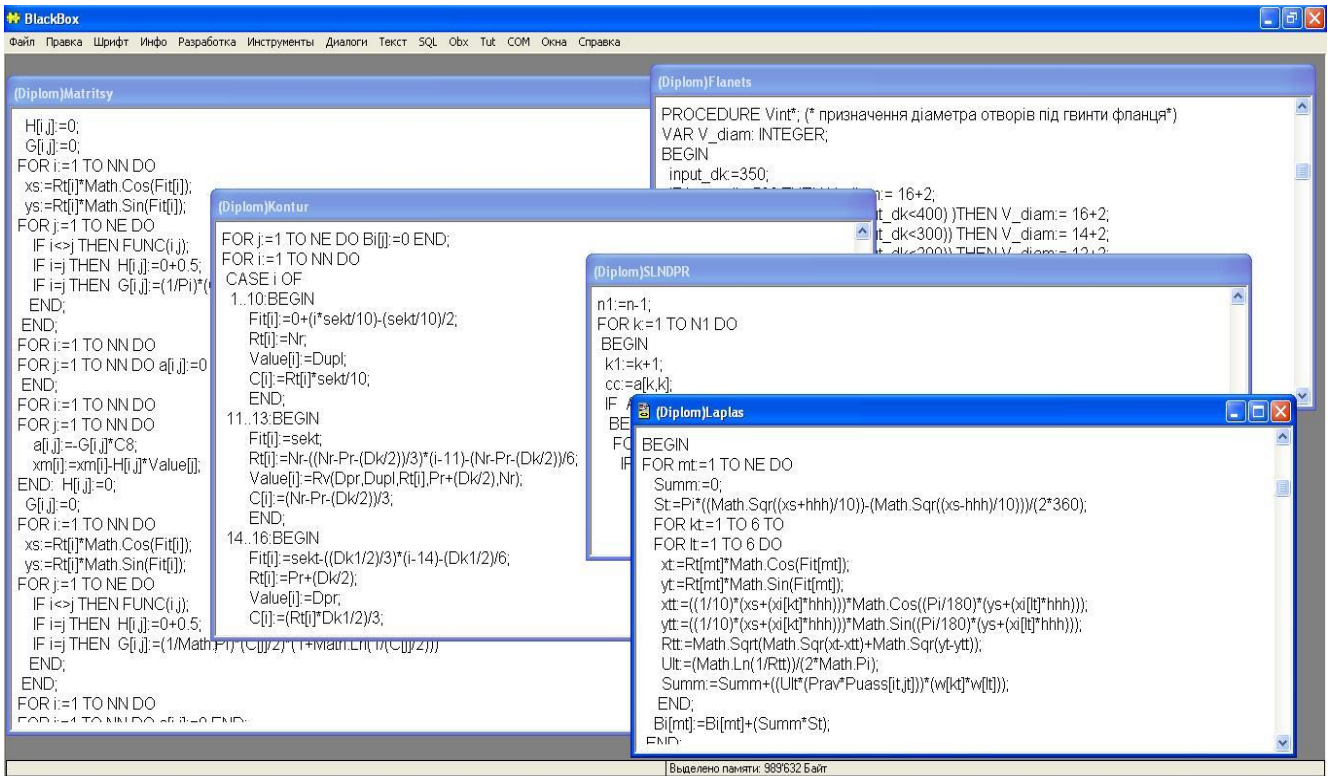


Рисунок 4.4 – Проектування САПР в Blackbox Component Builder

- модуль перерахування розмірів (масштабування) базової конструкції фланця під розміри ущільнювальної камери й ротора компресора;
- модуль перерахування розмірів (масштабування) базової конструкції несучої втулки під розміри ущільнювальної камери й ротора компресора;
- модуль розрахунків параметрів плинущого газу в робочому зазорі ГЗІТУ по залежностях (2.1 – 2.8);
- модуль розрахунків розмірів ущільнювальних кілець і геометрії (площа торцевого зазору, кількість розмір камер, кількість і розмір живильників) торцевих поверхонь;



- модуль створення ділянок торцевого зазору (контурів) для чисельного розв’язку рівняння Лапласа (3.6);
- модуль чисельного інтегрування по елементах контуру;
- модуль розв’язку інтегрального рівняння (3.8);
- модуль формування матриць (3.9);
- модуль розв’язку системи рівнянь (3.10);
- модуль обчислення правої частини диференціального рівняння у вигляді (3.11);
- модуль розв’язку основного інтегрального рівняння (3.12);
- модуль візуалізації розподілу тиску торцевому зазорі;
- модуль обчислення несучої здатності півки газу в торцевому зазорі й визначення по ній параметрів пружин;
- модуль запису у файл синтаксичних блоків мовою проектування Autolisp;
- модуль інтерфейсу;
- модуль ініціалізації й керування.

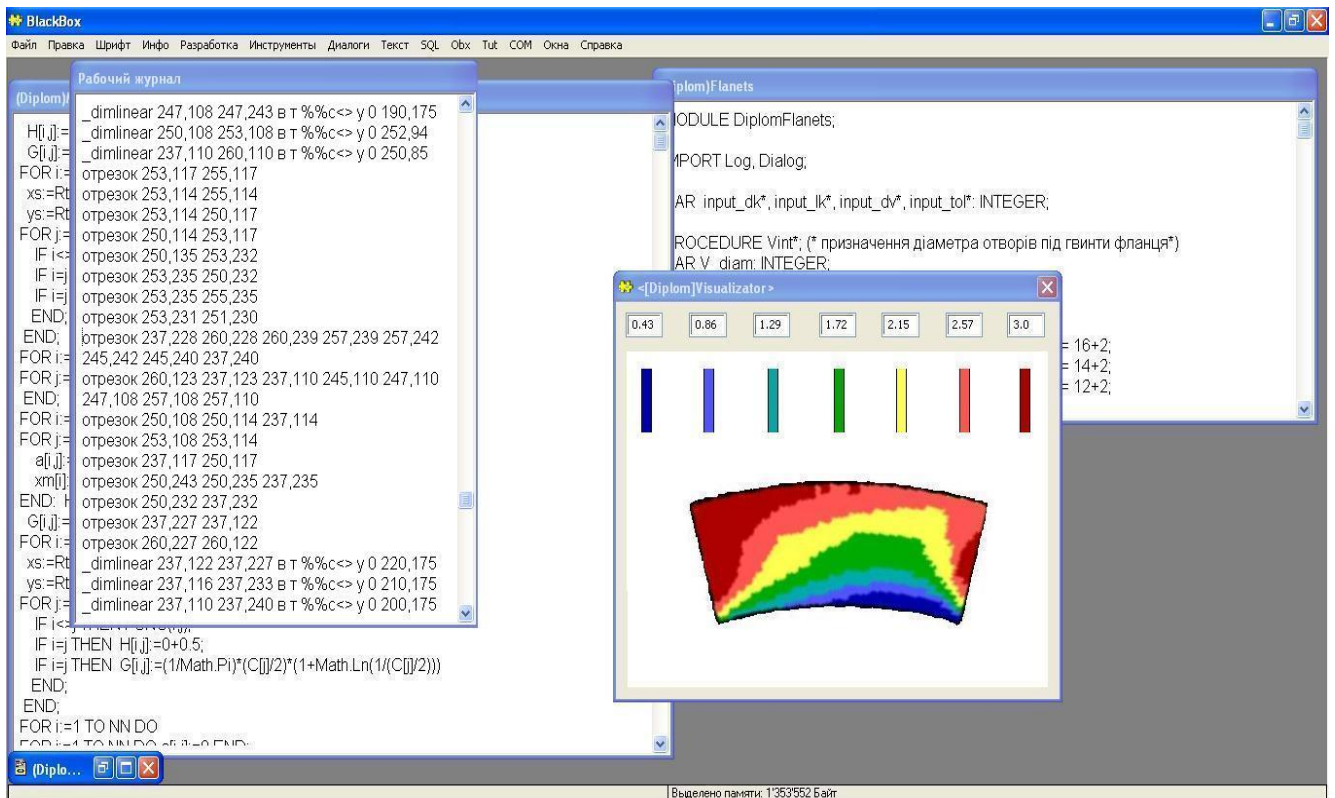


Рисунок 4.5 – Моделювання розподілу тиску в торцевому зазорі ГЗІТУ

У якості прототипу ГзІТУ для проектування взятий промисловий варіант конструкції із зовнішнім (стосовно ущільнювальних кілець) розташуванням області із ущільнювальним середовищем, з подачею затворного газу через живильні канали в нерухомому (статорному) кільці, що закріплюється у фланці; з обертовим, маючим осьову рухомість ущільнювальним кільцем з камерами (рисунок 1.2).

На рисунку 4.5 представлено моделювання розподілу тиску газу в торцевому зазорі для таких умов експлуатації: частота обертання ротора – 2000 об/хв, тиск затворного газу – 0,3 МПа, тиск середовища, що ущільнюється, – 0,1 МПа.

Отримані результати дають можливість спрогнозувати працездатність і ефективність експлуатації ущільнення на даних робочих параметрах. Отримані результати дозволили виявити характер впливу режимних параметрів і конструктивних особливостей кілець торцевої пари на працездатність ущільнення; характер розподілу тиску в зазорі залежно від умов роботи й геометрії ущільнювальних кілець.

Описаний підхід у розв'язку завдань плинину газу в торцевому зазорі дозволяє значно прискорити процес теоретичного дослідження й проектування різних ущільнювальних систем, що працюють у безконтактному режимі на рідинному або газовому змащенні.

Одним зі спеціальних засобів автоматизації створення креслення є файли сценаріїв креслень (пакетні файли) AutoCAD'а. Такий файл, що має розширення імені «.scr», містить текстовий запис команд AutoCAD'а з усіма необхідними аргументами команд, як якби вони вводилися в командному рядку AutoCAD'а із клавіатури (сценарій створюється в кодировці ASCII і містить набір інструкцій для командного рядка AutoCAD). Текст сценарію являє собою програму для AutoCAD'а, яка виконується без втручання користувача. Файли сценаріїв можна викликати під час роботи в середовищі графічного редактора AutoCAD'а або в момент запуску системи, роблячи необхідні для початку роботи налаштування. Створюючи файли сценаріїв потрібно зберігати порядок слідування команд, аргументів команд, їх опцій, розташування пробілів, переводів рядків при записі

інформації (AutoCAD нечутливий до регістру написання команд, опцій, імен системних змінних) [36].

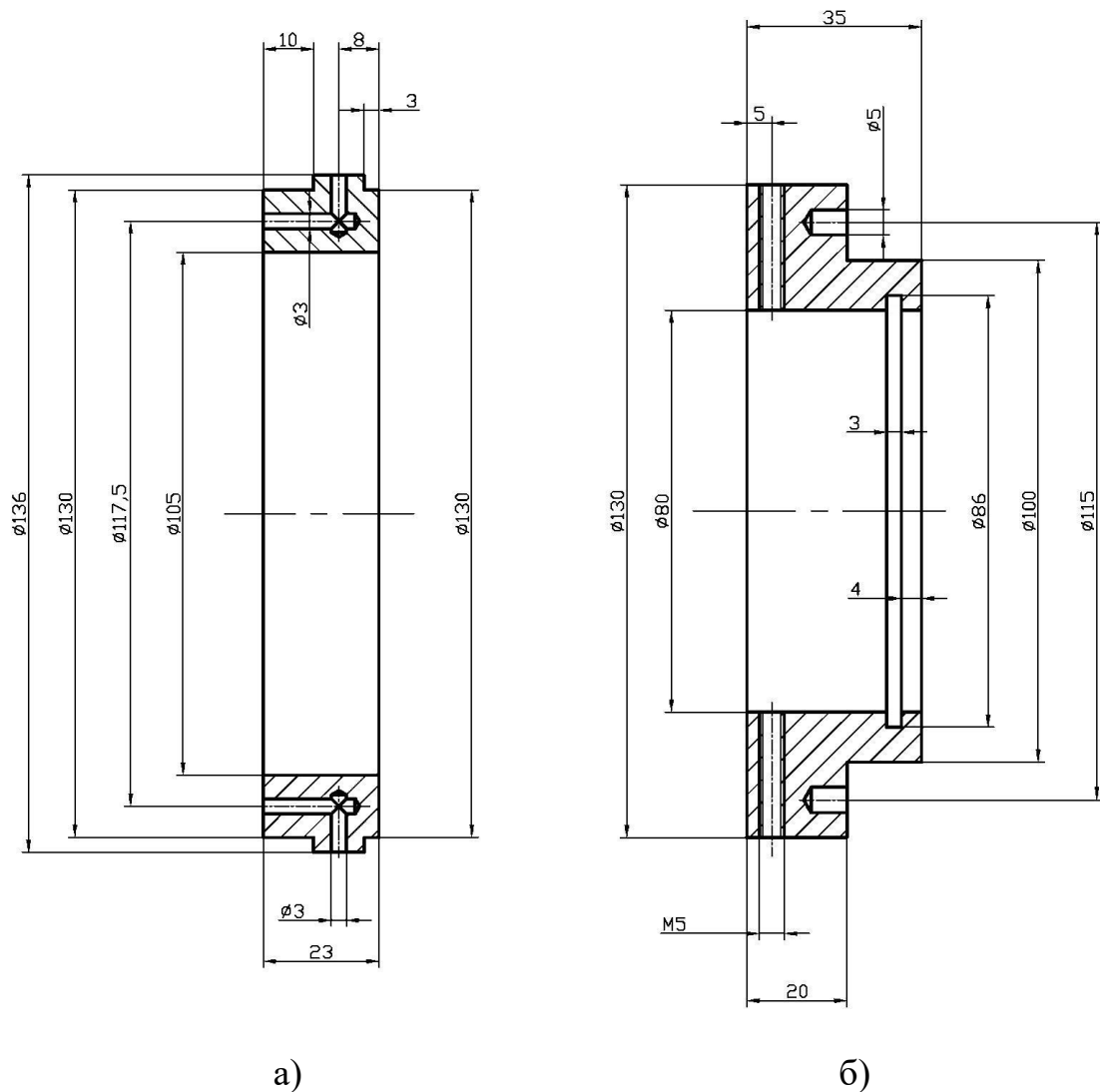


Рисунок 4.6 – Креслення деталей ГзІТУ, одержувані за допомогою САПР

- а). креслення торцевого кільця з живильниками;
- б). креслення несучої втулки

Для створення креслень у САПР ГзІТУ використана методика створення файлу команд AutoCAD'a у вигляді сценаріїв креслень елементів ущільнення. Обчислені геометричні розміри кожного елемента являють собою діаметри й осьові довжини поверхонь. Усі вони представлені на кресленнях у вигляді ліній певної довжини, зорієнтовані й розташовані на заданій відстані від базового центру побудови. Таким чином, у файл сценарію креслення записується набір команд, що будують відрізки й / або ламані лінії, що утворюють контур елемента

(деталі) ущільнення, Також у файли сценаріїв додаються специфічні примітиви; осьові лінії, штрихування замкнених областей, розміри.

У результаті роботи САПР інженер-конструктор одержує комплект файлів зі сценаріями побудови креслень елементів ГзІТУ. Приклад отриманих креслень наведено на рисунку 4.6.

### 4.3 Висновки

У ході роботи отримані наступні практичні й наукові результати:

1. Виконане моделювання проекрованої САПР ГзІТУ, що дозволило систематизувати вимоги до системи й представити її у вигляді окремих функціональних блоків, що послідовно виконують поставлену перед системою задачу. Визначені варіанти використання системи і її взаємодії з розроблювачем (інженером-конструктором).

2. Розроблений алгоритм і створена система автоматизованого проектування газозотворного імпульсного торцевого ущільнення, що дозволяє на підставі даних про умови експлуатації спроектувати й представити у вигляді креслень складових елементів конструкцію ущільнення.

3. Розроблена САПР оснащена візуалізацією робочого процесу проектованого ущільнення у вигляді картини розподілу поля тиску затворного газу в торцевому зазорі, що дає можливість проводити чисельні дослідження впливу геометричних характеристик зазору (діаметра ущільнювальних кілець, кількості й місця розташування камер і живильних каналів) на здатність ущільнення зберігаючи безконтактний режим роботи запобігати витоку середовища, що перекачується.

## ВИСНОВКИ

В виконання ході роботи з'ясовано, що вдосканалення існуючих підходів у проектуванні газодинамічних ущільнень може забезпечити швидкість отримання проектної документації, цілісність процесу проектування та моделювання роботи розроблюваних виробів.

Основні результати, отримані в роботі, полягають у наступному:

1. Проведений огляд і аналіз спеціальної науково-технічної інформації. Розглянуті найпоширеніші й новітні схеми ущільнювальних систем, принципи їх роботи, конструкції, сфери застосування, їх гідності й недоліки. У стані перспективних безконтактних ущільнень особливе місце займає газозатворне імпульсне торцеве ущільнення, яке завдяки імпульсному принципу формування й підтримування безперервного шару затворного газу в торцевому зазорі має унікальні властивості, що вигідно відрізняють його від інших систем газових ущільнень

2. Розроблена фізична модель роботи ГзІТУ. Математичний аналіз моделі дозволяє розкрити механізм функціонування ущільнювальних вузлів даного типу, умови їх працездатності. Розглядаючи вузол як систему автоматичного регулювання, на основі запропонованої математичної моделі знайдені залежності для визначення основних статичних параметрів.

3. Розроблений алгоритм чисельного розв'язку рівняння руху газу в торцевому зазорі між рухомими ущільнювальними кільцями ГзІТУ (рівняння Рейнольдса для процесу, що встановився), за допомогою якого стало можливим моделювання роботи ущільнення шляхом визначення розподілу тиску в зазорі для ряду умов роботи. Це дозволило знаходити несучу здатність шару газу, не прибігаючи до натурних експериментів визначити діапазон роботи ущільнення як затворного.

4. Розроблений алгоритм інженерного проектування ГзІТУ в плані одержання геометричних розмірів кожного елемента ущільнення й візуальної

оцінки дотримання герметичного режиму експлуатації в заданому діапазоні робочих параметрів.

5. Розроблений механізм автоматизованого створення креслень окремих елементів на основі трансформації базової конструкції ГЗІТУ з метою прискорення розробки, зниження трудомісткості й затрат часу, підвищення якості проектних робіт.

Наукова новізна та практична цінність рботи:

1. Розроблена математична модель функціонування газатворного імпульсного торцевого ущільнення, яка основана на сумісному розв'язанні рівняння рівноваги ущільнювального кільця під дією зусиль з боку робочих тисків та рівняння балансу расходів затворного газу через робочий зазор, яка дозволяє визначати геометричні характеристики ущільнювальних поверхонь в залежності від параметрів експлуатації.

2. Розроблений алгоритм та методика чисельного розв'язання рівняння Рейнольдса, які дозволяють отримати розв'язки для широкого кола задач газо- та гідродинаміки ущільнень та підшипників ковзання з плоскими робочими поверхнями.

3. Розроблена технологія проектування довела, що використання запропанованих математичних моделей, алгоритмічного та програмного забезпечення забезпечує гнучкість та наглядність процесу проектування, зменшує трудомісткість та затрати на час розробки. Вона може бути застосована на підприємствах як елемент загальної системи автоматизованого проектування виробів компресорної промисловості, забезпечити їх якість та конкурентноспроможність.

Подальшими напрямками у розвитку та вдосконаленні розроблених матмоделей та інформаційної технології слід вважати адаптацію їх до розробки ущільнень та підшипників ковзання з непараллельними зазорами, неплоскими робочими поверхнями.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Марцинковський В. А. Безконтактні ущільнення роторних машин. – М.: Машинобудування, 1980.– 200 С.
2. Ущільнення і ущільнювальна техніка. Довідник./ Під загальною ред. Голубєва А. І. Кондакова Л. А. – М.: Машинобудування, 1986, 464 с.
3. J. Nosowicz. Mechanical seals for the application in power plants. \ Seals and Sealing Technology in Machines and Devices, IXth International Conference, Wroclaw, 2001, pp. 77 – 84.
4. А.с. 1541451 СРСР МКІ F 16 J 15/34. Ущільнення валу / Пшик В. Р., Марцинковський В. С., Черепов Л. В., Марцинковський В. А. (СРСР). Заявл. 23.02.88; Опубл. 7.02.90, Бюл № 9.
5. А.с. 1668790 СРСР МКІ F 16 J 15/34. Торцеве гідростатичне ущільнення з регульованим зазором / Білоусов А. І., Фалалєєв С. В. (СРСР). Заявл. 10.07.89; Опубл. 7.08.91, Бюл № 29.
6. А.с. 446695 (СРСР). Торцеве ущільнення з регульованим витокком / К. В. Лісцін, В. А. Марцинковський, Н. В. Передрій. Опубл. у Б. І. 1974. Т 38.
7. А.с. 861807 (СРСР). Торцеве ущільнення з регульованим витокком / В. В. Москаленко, К. В. Лісцін, П. Н. Ворона. Опубл. у Б. І. 1981. Т 33.
8. А.с. 919444 (СРСР) Торцеве ущільнення з регульованим витокком / В. В. Москаленко, К. В. Лісцін, Н. В. Передрій. Опубл. у Б. І. 1982. Т 13.
9. Москаленко В. В., Лісцін К. В., Марцинковський В. А. Характеристики та досвід експлуатації імпульсних торцевих ущільнень. Праці VI науково-технічної конференції «Ущільнення і вібраційна надійність відцентрових машин» м.Суми, 1991 р..
10. Москаленко В. В., Лісцін К. В. Порівняльні випробування торцевих ущільнень з різною формою ущільнювальної поверхні. – В кн.: Дисоціюючі гази як теплоносії і робочі тіла АЕС. 4.1. Мінськ: ІЯЕ АН БРСР, 1982, с.134-141.

11. Москаленко В. В., Лісичин К. В., Кустов В.П. Досвід застосування імпульсних торцевих ущільнень у високооборотних насосах АЕС // Електричні станції, 1984, номер 12, с.17-18.
12. Лапоног С. Т., Чернов О. Є., Марцинковський В. А., Громико Б. М. Дослідження імпульсних торцевих ущільнень на високі параметри. Праці VI науково-технічної конференції «Ущільнення і вібраційна надійність відцентрових машин» м.Суми, 1991 р.
13. Громико Б. М., Марцинковський В. А., Чернов О. Є, Розробка ущільнень роторів ТНА. Праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Насоси-96», т.2.- Суми: ІПП» Мрія-1 " ЛТД 1999,, с.122-135.
14. Пономаренко В. В., Чернов О. Є., Громико Б. М., Колпаков А. В. Розрахунок характеристик імпульсних торцевих ущільнень з урахуванням деформацій ущільнювальних кілець. Праці IX Міжнародної науково-технічної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та компресорного обладнання» ГЕРВІКОН – 99, Т.1.– Суми: СумДУ Різоцентр, 1999, с.120-127.
15. Чернов О. Є., Пономаренко В. В., Кавязін А. В. Комп'ютерне моделювання теплового стану імпульсних торцевих ущільнень. Праці IX Міжнародної науково-технічної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та компресорного обладнання» ГЕРВІКОН – 99, Т.1.– Суми: СумДУ Різоцентр, 1999, с.114-119.
16. Громико Б. М., Колпаков А. В., Чернов О. Є. Досвід розробки торцевих імпульсних ущільнень для швидкохідних турбонасосів. Праці IX науково-технічної Міжнародної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та компресорного обладнання» ГЕРВІКОН – 99, Т.1.– Суми: СумДУ Різоцентр, 1999, с.151 – 159.
17. Герасимов А. А., Пономарьов Ю. Н., Іванов Р. Г., Громико Б. М. Експериментальні дослідження імпульсного торцевого ущільнення в криогенному середовищі. Праці IX науково-технічної Міжнародної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та



компресорного обладнання» ГЕРВІКОН – 99, Т.1.– Суми: СумДУ Різоцентр, 1999, с.207 – 212.

18. Герасимов А. А., Пономарьов Ю. Н., Іванов Р. Г., Валюхов С. Г., Наугольников В. П. Принципи проектування імпульсного торцевого ущільнення. Праці ІХ науково-технічної Міжнародної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та компресорного обладнання» ГЕРВІКОН – 99, Т.1.– Суми: СумДУ Різоцентр, 1999, с.213-222.

19. Овсейко І. В., Скирдаченко Є. І. Модернізація відцентрових хімічних насосів. Праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Насоси-96», т.2.- Суми: ІПП» Мрія–1 ЛТД 1999,, с.91-99.

20. Y. Gaft et al. Development and application of double pulse gas-liquid seals. // Proc. 16th International Conf. Of Fluid Sealing.- Brugge, Belgium, 2000. – P. 255-269.

21. Марцинковський В. А. Насоси атомних електростанцій [Текст] / Марцинковський В. А., Ворона П. Н. – М. : Енергоатоміздат, 1987. - 256 с.

22. Кузнєцов Е. Г. Чисельна модель плинину газу в робочому зазорі газозатворного імпульсного торцевого ущільнення [Текст] / Кузнєцов Е. Г., Савін Л. А. // Мир транспорту й технологічних машин. - Орел: ОрелГТУ, 2013. - №1(40). - С. 27-32.

23. Кузнєцов Е. Г. Сучасні затворні торцеві ущільнення валів відцентрових машин [Тези доповіді] / Кузнєцов Е. Г, Твердохліб І. Б., Чернов О. Е. // Сучасний стан і перспективи розвитку гідромашинобудування в ХХІ столітті: Праці Міжнародної науково-технічної конференції. - СПб: Нестор, 2003. - С. 193 – 194.

24. Константинеску В. Н. Газове змащення. Пер. с руминск. Під ред. М.В. Коровчинського. М., вид-во «Машинобудування», 1968, 709 стор.

25. Кузнєцов Е. Г. Дослідження витратних характеристик торцевого затворного імпульсного ущільнення [Текст] / Кузнєцов Е. Г., Савін Л. А. // Фундаментальні й прикладні проблеми техніки й технології. - Орел: ОрелГТУ, 2010. - №5(283). - С. 9-13.

26. Кузнєцов Е. Г. Використання методу граничних елементів для визначення тиску в змащувальному шарі торцевого газозатворного ущільнення імпульсного

типу [Текст] / Кузнецов Е. Г. // Вісник СумДУ. сер. Технічні науки (Машинобудування). - Суми: вид-во СумДУ, 2003. - №13(59). - С. 188-194.

27. Кузнецов Е. Г. Теоретичні й експериментальні дослідження газозатворного імпульсного торцевого ущільнення [Текст]/ Кузнецов Е. Г. // Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного та компресорного обладнання: Праці 11-ї міжнародної науково-технічної конференції «Гервікон-2005»: в 3 т. - Суми: вид-во СумДУ, 2005. - Т. 2. - С. 156-164.

28. Пешті Ю. В. Газове змащення. М.: Машинобудування. 1991.

28. Шейнберг С. А., Жедь В. П., Шишеев М. Д. Опори ковзання з газовим змащенням. - М.: Машинобудування, 1969. - 336 стор.

30. Лучін Г. А., Пешті Ю. В., Снопов А. І. Газові опори турбомашин. М.: Машинобудування, 1989. - 240 с.

31. Метод граничних елементів у прикладних науках: Пер. с англ./ Беннерджи П., Баттерфилд Р. – М.: Мир, 1984.

32. Метод граничних інтегральних рівнянь: Пер. с англ./ Круз Т., Риццо Ф. – М.: Мир, 1978.

33. Методи граничних елементів у механіці твердого тіла: Пер. с англ./ Крауч С., Старфилд А. – М.: Мир, 1987.

34. Громадка П Т., Лей Ч. Комплексний метод граничних елементів в інженерних завданнях: Пер. с англ.-М.: Мир, 1990. - 303 с.

35. Потопахін В. Сучасне програмування з нуля! – М.: ДМК Пресс, 2016. – 240 с.: іл.

36. Розробка застосунків для продуктів AutoDesk: Навч. посібн. – Хмельницький: ХНУ, 2017. – 313 с.

## ДОДАТОК А

### ПЛАНУВАННЯ РОБІТ

Мета проекту: розробити систему автоматизованного проектування газозатвірного імпульсного торцевого ущільнення, яка дозволить виконувати інженерні розрахунки та отримувати геометричні розміри елементів ущільнення, виконувати моделювання робочого процесу ущільнення та отримувати відповідну розрахункам креслярську документацію на ущільнення.

Результати деталізації мети проекту методом SMART представлені у таблиці А1.

Таблиця А.1 – Деталізація мети проекту методом SMART

S - Specific	Розробити систему автоматизованного проектування газозатвірного імпульсного торцевого ущільнення
M - Measurable	Оскільки даний проект є некомерційним та не має оцінювачів. Інструментами для виміру в даному випадку є експертна група оцінювання його роботи.
A - Achievable	Мета даного проекту може вважатися досяжною оскільки вона була ретельно вивчена, обговорена та узгоджена командою проекту.
R - Relevant	Усе необхідне для реалізації проекту апаратне та програмне забезпечення доступне та коректно працює (система комп'ютерного моделювання та автоматизації креслення – AutoDesk AutoCAD; компонентний каркас для надання високорівневих абстракцій при побудові складних програмних систем з довгостроковим терміном еволюції та високими вимогами до надійності – BlackBox Framework). Команда проекту достатньо кваліфікована та обізнана в необхідних для виконання проекту інструментах.

T - Time-framed	Для даного проекту встановлені часові обмеження, які визначені керівником проекту та описані в календарному плані. Проект буде виконано вчасно, що підтверджується календарним планом проекту.
-----------------	--

### А.1 Планування змісту структури робіт ІТ-проекту (WBS)

WBS служить інструментом для планування змісту структури робіт проекту. Це графічне представлення проекту у вигляді ієрархічної структури робіт, яка формується шляхом розбиття проекту на конкретні результати, що повинні бути досягнуті на певних рівнях для виконання мети. WBS є, безумовно, найбільш ефективним способом для візуалізації всього проекту, а також надає можливість сфокусувати увагу учасників проекту на очікуваному результаті.

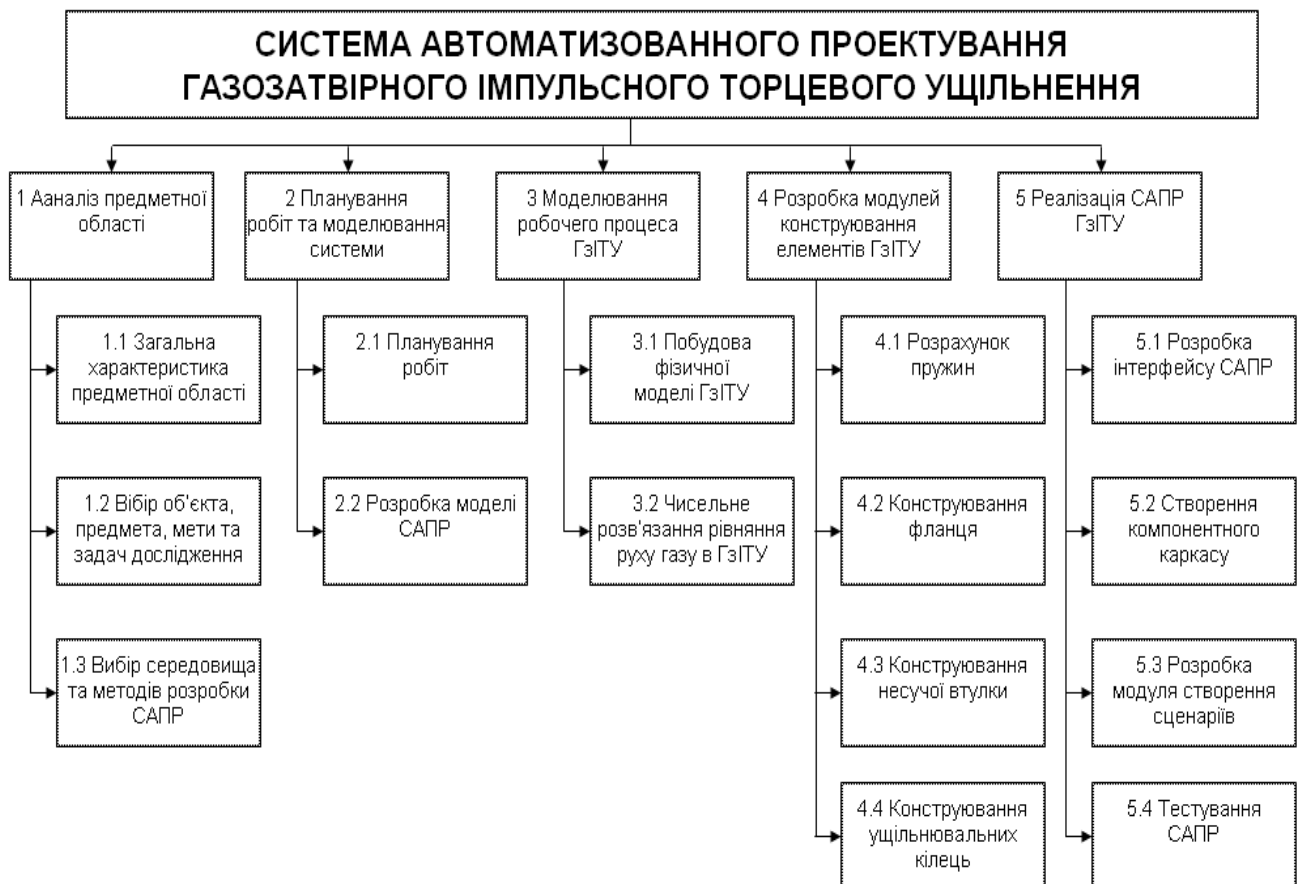


Рисунок А.1 – Ієрархічна структура робіт проекту

Оскільки описаний результат є бажаним досягненням проекту, спланувавши зміст структури робіт, отримано достатньо стабільний набір категорій, узгоджених із командою, на які вона може опиратися в майбутньому. Сформована діаграма WBS представлена на рисунку А1.

## А.2 Планування структури організації, для впровадження готового проекту (OBS)

Після закінчення побудови WBS виконується розробка організаційної структури виконавців проекту OBS (Organization structure). OBS являє собою графічне представлення проекту у вигляді осіб, що задіяні в реалізації проекту, відповідальних за певні пакети робіт.



Рисунок А.2 – Організаційна структура проекту

Правильно сформована організаційна структура визначає роботу кожного учасника проекту і те, як він вписується в загальну систему.

Простіше кажучи, організаційна структура визначає, хто що робить, для досягнення цілей проекту. Кінцева організаційна структура виконавців проекту представлена на рисунку А.2.

### А.3 Побудова матриці відповідальності (виконавців пакетів робіт)

На основі двох попередньо розроблених структур проекту (WBS та OBS) створюється комунікаційний документ, який формалізує відповідальність ролей або конкретних людей за виконання завдань та отримання кінцевих результатів проекту – матриця відповідальності, або Responsibility Assignment Matrix (RAM). Існує декілька моделей матриць відповідальності, які враховують тип втручання в проект. Розроблена матриця відповідальності представлена в таблиці А.2.

Таблиця А.2 – Таблиця відповідальності проекту (RAM)

Фази	Виконавці	
	Кузнєцов Е. Г.	Лавров Є. А.
Аналіз предметної області	+	+
Вибір об'єкту та предмету дослідження, формування мети дослідницької роботи та задач для її досягнення	+	–
Планування дослідницької роботи	+	+
Розробка моделі САПР	+	–
Розробка модуля розрахунків елементів ущільнення	+	–
Розробка модуля моделювання робочого процесу ущільнення	+	–
Розробка модуля програмування сценаріїв	+	–

креслень мовою AutoLISP		
Реалізація САПР та тестування	+	+
Здача в експлуатацію	+	+

#### А.4 Розробка PDM-мережі (розгорнутий вигляд мережевих діаграм Ганта)

Для кожного пакету робіт, визначеного в структурі WBS, створюються мережеві моделі, в яких встановлюють зв'язки між усіма роботами проекту. Такі мережеві моделі дозволяють отримати визначену тривалість виконання проекту, а також окремих пакетів робіт. На даний момент частіше використовуються PDM-мережі типу «вершина-робота», які складаються з двох типів елементів: робіт, які розташовані у вузлах, та стрілок, які представляють собою переходи та є логічними взаємозв'язками між роботами проекту результат наведено на рисунку А.3.

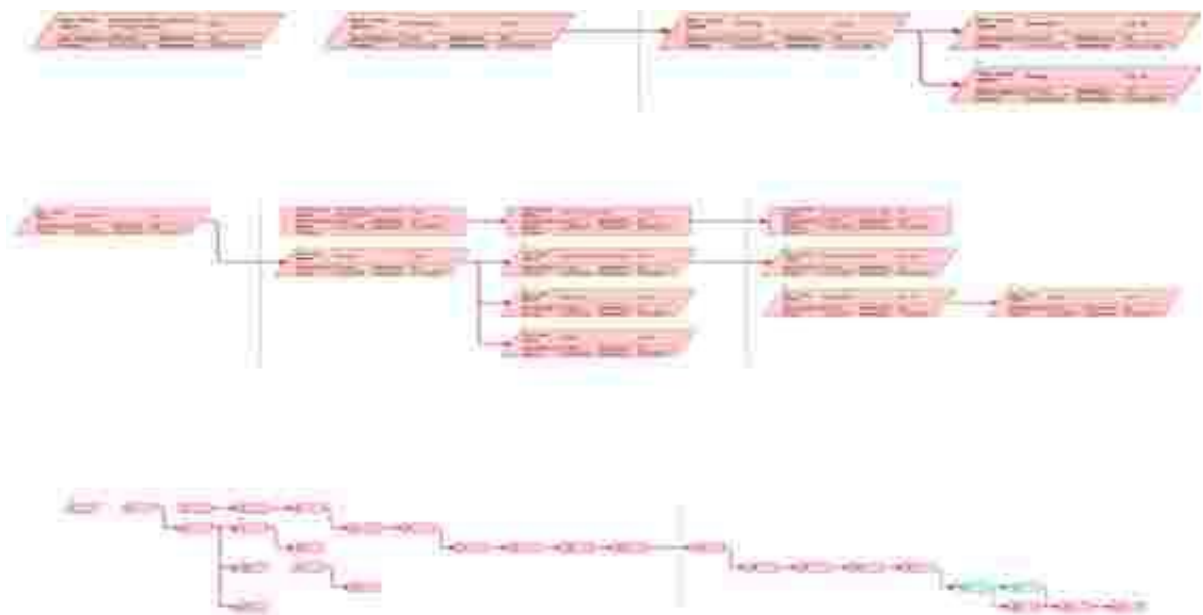


Рисунок А.3 – Сумарні задачі PDM-мережі. PDM-мережа у згорнутому до основних моментів вигляді. PDM-мережа у повному вигляді

Діаграма Ганта дозволяє отримати реальне уявлення про тривалість проекту з урахуванням вихідних та святкових днів, а також з урахуванням обмеженості ресурсів. Вона являє собою горизонтальні відрізки, розташовані між двома осями:

списком робіт та шкалою часу. Розташування даного відрізка позначає початок, кінець та тривалість певної роботи, також дуже зручно можуть бути показані зв'язки між роботами та відсоток виконаних робіт по кожному завданню (рисунок А.4).

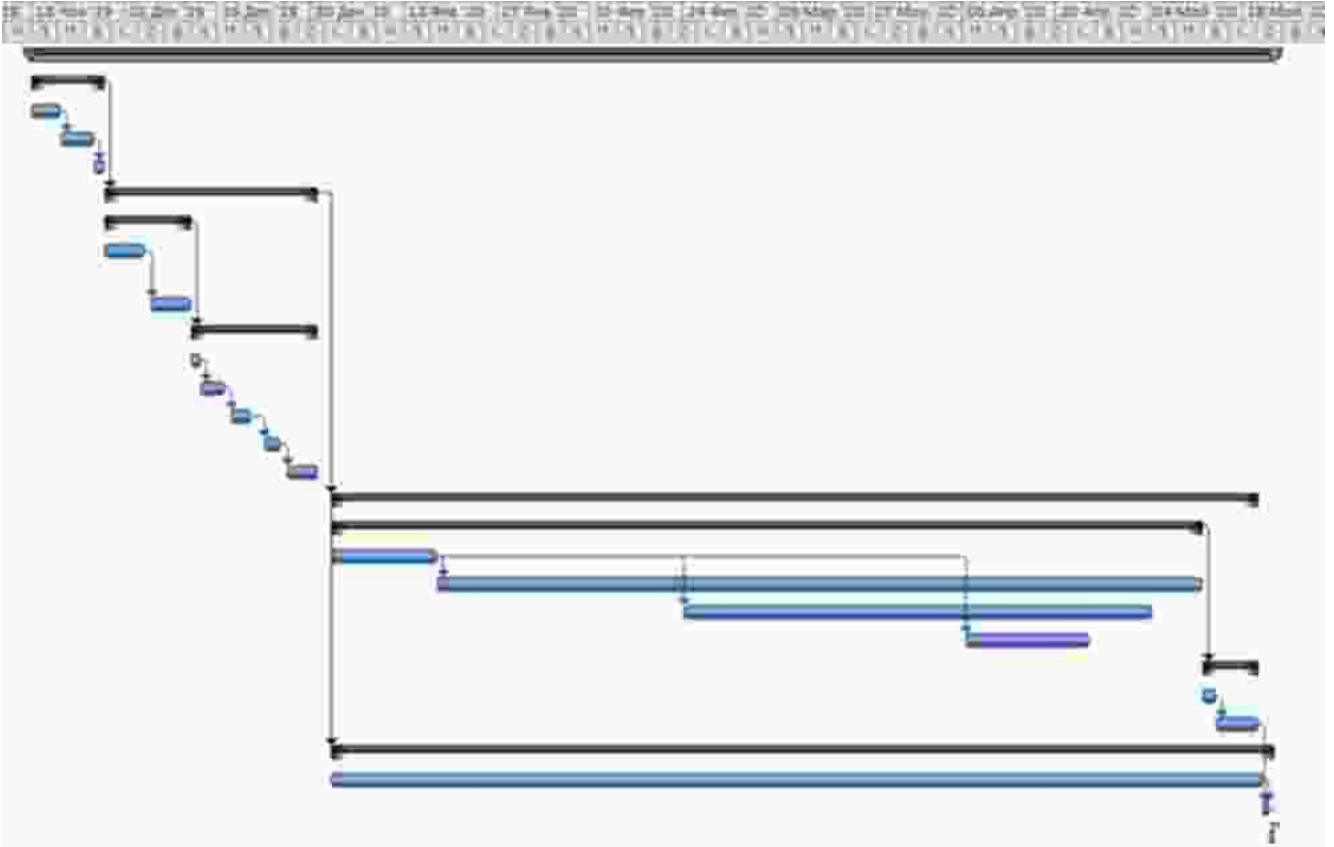


Рисунок А.4 – Діаграма Ганта