

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

Г. А. Бондаренко, В. М. Бага

**ОСНОВИ СУЧАСНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ  
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН**

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету



Суми  
Сумський державний університет  
2020

УДК 621.5:621.51

Б 81

Рецензенти:

*В. П. Парафійник* – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник СКБ АТ «Сумське НВО-інжиніринг»;

*В. М. Арсеньєв* – кандидат технічних наук, професор, професор Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання  
вченою радою Сумського державного університету  
як навчальний посібник  
(протокол № 4 від 15 жовтня 2020 року)*

**Бондаренко Г. А.**

Б 81 Основи сучасної методології наукових досліджень енергетичних машин : навчальний посібник / Г. А. Бондаренко, В. М. Бага. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 101 с.

ISBN 978-966-657-842-9

У навчальному посібнику наведені основні відомості про напрямки розвитку, організації, планування та виконання науково-дослідних робіт. Викладено методичні основи проведення експериментальних і теоретичних досліджень з урахуванням сучасних вимог. Викладення матеріалу посібника виконано згідно з вимогами галузі енергомашинобудування.

Призначений для здобувачів, які навчаються за спеціальністю «Енергетичне машинобудування» денної, заочної та дистанційної форм навчання. Він може бути корисним для аспірантів і наукових працівників, що досліджують галузь енергомашинобудування.

**УДК 621.5:621.51**

ISBN 978-966-657-842-9

© Бондаренко Г. А., Бага В. М., 2020

© Сумський державний університет, 2020

	<b>ЗМІСТ</b>	<b>С.</b>
<b>Вступ</b> .....		5
<b>Передмова</b> .....		6
<b>Розділ I Стан і тенденції розвитку технічних наук</b> .....		7
Глава 1 Вступ.....		7
1.1 Основні визначення і терміни з дисципліни.....		7
1.2 Енергетичні машини як об’єкт дослідження .....		9
1.3 Проблематика досліджень енергетичних машин .....		13
1.4 Тематика наукових досліджень енергетичних машин .....		18
Питання до глави 1.....		19
Глава 2 Ретроспектива розвитку наукових досліджень .....		20
2.1 Становлення основ наук .....		20
2.2 Перспективи інтеграції наук .....		22
2.3 Глобальна комп’ютеризація .....		23
Питання до глави 2.....		25
Глава 3 Напрямки розвитку технічних наук .....		26
3.1 Перспективи та тенденції розвитку технічних наук.....		26
3.2 Розвиток методів теоретичного дослідження .....		28
Питання до глави 3.....		33
<b>Розділ 2 Сучасні методи дослідження</b> .....		34
Глава 4 Основи математичного моделювання енергетичних машин .....		34
4.1 Основні поняття методології .....		34
4.2 Методи обчислювальної газодинаміки (CFD) .....		35
4.3 Інструментарій CFD-методів .....		42
Питання до глави 4.....		44

Глава 5 Математичне моделювання	
складних енергетичних машин .....	45
5.1 Об'єкти дослідження .....	45
5.2 Складні технічні системи .....	46
5.3 Ієрархічні рівні і завдання моделювання .....	47
5.4. Використання формальних мікромоделей .....	50
Питання до глави 5.....	53
Глава 6 Комплексний аналіз конструкції	
енергетичних машин.....	54
Питання до глави 6.....	62
<b>Розділ 3 Деякі спеціальні методи дослідження</b>	
<b>енергетичних машин .....</b>	<b>63</b>
Глава 7 Основні відомості про методи оптимізації	
конструкцій енергетичних машин .....	63
7.1 Постановка завдання оптимізації .....	63
7.2 Методи оптимізації.....	66
7.3 Деякі способи зменшення розмірності	
завдань оптимізації.....	68
Питання до глави 7.....	71
Глава 8 Кібернетичні методи дослідження.....	73
8.1 Загальні відомості.....	73
8.2 Кібернетичне моделювання.....	74
8.2.1 Кібернетичне уявлення об'єкта.....	74
8.2.2 Модель «чорної скриньки».....	75
8.2.3 Алгоритм ідентифікації моделі.....	76
Питання до глави 8.....	77
Список використаних джерел .....	79
ДОДАТОК А.....	80
ДОДАТОК Б.....	87
ДОДАТОК В.....	91

## **Вступ**

Навчальний посібник розрахований на здобувачів 1-х і 2-х курсів магістратури з метою вивчення дисципліни «Дослідження енергетичних машин».

Посібник складений на основі лекцій, що читаються для студентів спеціальності «Енергетичне машинобудування» освітньо-професійних програм «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка» і «Холодильні машини і установки».

Навчальний посібник містить вісім тем, що охоплюють періоди розвитку сучасних методів теоретичного дослідження енергетичних машин, сучасний стан, тенденції і перспективи подальшого розвитку методології досліджень, і три додатки, які ілюструють приклади використання деяких методів дослідження.

## Передмова

Запропонований навчальний посібник є доповненням до навчального посібника Г. А. Бондаренка «Основы научных исследований в энергетике» (Суми, видавництво СумДУ, 2013, 202 с.), рекомендованого для студентів, що навчаються за спеціальністю «Енергетичне машинобудування».

Необхідність у доповненні зумовлена суттєвими змінами в навчальній програмі з цього курсу у зв'язку з переходом на двоступеневу (бакалавр, магістр) підготовку випускників і збільшенням терміну навчання в магістратурі.

У вищеназваному навчальному посібнику викладені загальні основи організації і методології проведення теоретичних і експериментальних наукових досліджень з ілюстрацією спрощених прикладів.

У цьому виданні викладаються в достатньо широкій інтерпретації як відомі, так і нові сучасні спеціальні методи наукових досліджень із залученням знань із різноманітних розділів природничих наук, які супроводжуються більш змістовними і поглибленими прикладами з тематики досліджень енергетичних машин.

В умовах вкрай обмежених системних публікацій із цієї тематики, роздрібненості відомостей із різних джерел, які зазвичай важко доступні, цей посібник може надати суттєву допомогу у формуванні наукового світогляду магістрантів і аспірантів, що навчаються за спеціальністю «Енергетичне машинобудування».

Викладання матеріалу ґрунтується на досягненнях вітчизняних наукових шкіл турбобудування (ДТУ, ХПІ, ІПМаш НАНА, м. Харків) і компресоробудування (ВНДІкомпресор-маш, СумДУ, м. Суми), на основі лекцій професора Г. А. Бондаренка та лабораторних і практичних занять ст. викладача В. М. Баги на кафедрі технічної теплофізики СумДУ.

# РОЗДІЛ 1

## СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ НАУК

### ГЛАВА 1 ВСТУП

#### 1.1 Основні визначення і терміни з дисципліни

Спеціальність – енергетичне машинобудування.

Освітньо-професійні програми – холодильні машини та установки і компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка.

Що означають перші два терміни стосовно підготовки магістрів у нашому СумДУ? Ключові слова: «енергетика», «енергомашинобудування», сутність похідних від поняття «енергія».

Що означає поняття «енергія» в сучасному розумінні? Насамперед воно належить до фундаментальних термодинамічних понять Всесвіту. У класичній термодинаміці оперують поняттям «внутрішня енергія системи», яка містить у собі:

- 1) кінетичну енергію руху частинок;
- 2) потенційну енергію взаємодії частинок;
- 3) енергію електронних оболонок атомів;
- 4) внутрішню енергію атомів.

У більшості термодинамічних процесів дві останні складові залишаються незмінними (зокрема і у процесах теплоенергетичних машин). Отже, внутрішня енергія руху молекул та атомів і потенційна енергія їхньої взаємодії є однозначною функцією стану тіла  $p$ ,  $V$  і  $T$ . Можна додати, що у випадку компресорних і холодильних машин робочими тілами є, відповідно, газ, пари і рідини.

Що таке енергетика?

*Енергія – загальна кількісна міра руху і взаємодії усіх видів матерії.*

Види енергії:

- атомна;
- гідроенергетика;
- теплоенергетика;
- електроенергетика.

У природі існують різноманітні джерела енергії двох видів.

*Невідновлювальні енергоджерела (НДЕ):*

газ, нафта, вугілля (дають до 80 % енергії), а також деревина, торф, сланці.

Використання викопних палив сьогодні:

- ядерне – 5 %;
- газ – 20 %;
- вугілля – 30 %;
- нафта – 15 %.

*Відновлювальні (альтернативні) джерела (ВДЕ):*

сонячні, водні (річки, океани), геотермальні, вітряні, біомаса.

До 2020 р. прогнози використання відновлювальних джерел енергії – від 30 % до 12 % світової потреби в енергоресурсах, переважно завдяки використанню біомаси та сонячної енергії.

*Енергетика – галузь господарства, пов'язана з виченням енергетичних ресурсів; виробленням, перетворенням, розподілом і споживанням енергії різних видів (УРЕ, т. 12, Київ, 1985).*



## 1.2 Енергетичні машини як об'єкт дослідження

Вживаний термін «енергетичне машинобудування» переважно застосовується щодо парових, газових і гідравлічних турбін, які безпосередньо виробляють електроенергію (і теплову) на ТЕС, ТЕЦ, ГЕС і АЕС, звідси вирази «теплоенергетика», «гідроенергетика», «атомна енергетика» тощо.

Широко використовується поняття «теплоенергетика» – енергетика, що ґрунтується на перетворенні тепла палив переважно на теплову, механічну та електричну енергію (УРЕ, т. II, 1984 р.). Для цього служать теплосилові установки, основною частиною яких є теплові двигуни: парові і газові турбіни, іноді дизельні і газопоршневі двигуни.

Вражають своїми параметрами парові конденсаційні турбіни теплових електростанцій. Їхня потужність – більше ніж 1 млн кВт в одному агрегаті (рис. 1.1), а параметри пари – 32 МПа, 540 °С. Це надзвичайно складні інженерні утворення.

Широке застосування мають газові турбіни для літаків, суден, наземних транспортних засобів (автомобілів, локомотивів), транспорту природного газу, а також стаціонарні потужні газотурбінні установки (рис. 1.2). Їхня потужність досягає 32 МВт, а під час використання на ТЕЦ у парогазових циклах – до 50 МВт. Основною характеристикою ГТС є температура гарячої суміші, що досягає 100 °С і більше.

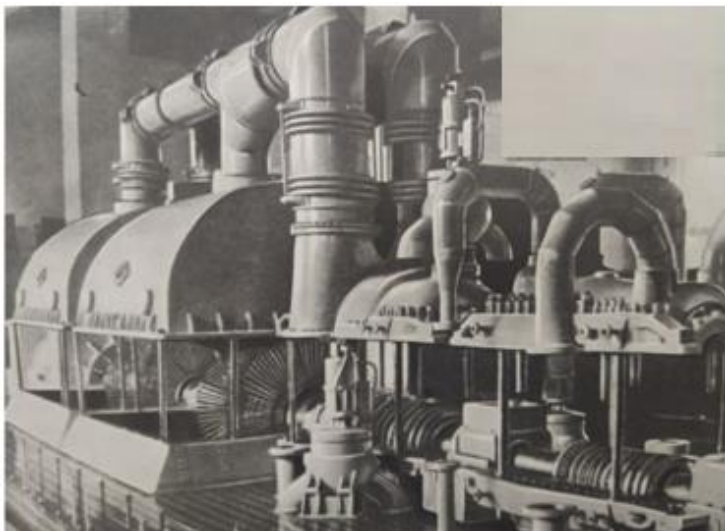


Рисунок 1.1 – Парова турбіна потужністю 500 МВт,  
«ХТГЗ ім. Кірова»

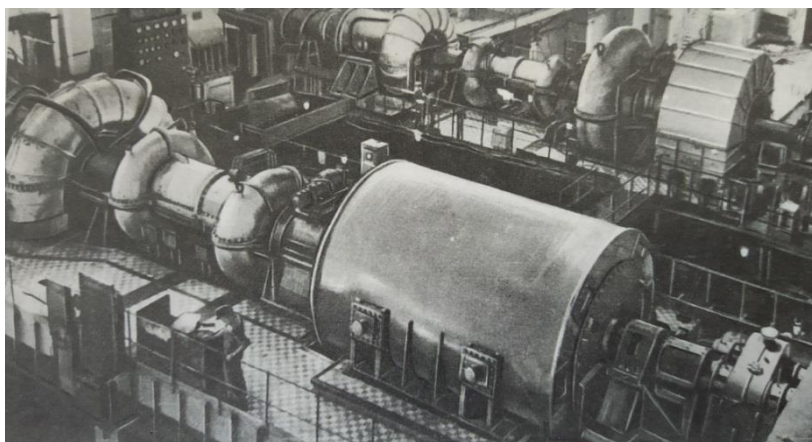


Рисунок 1.2 – Газовотурбінна енергетична установка  
потужністю 50 МВт

Призначення будь-якого теплового двигуна – приводити в дію різноманітні механічні системи та пристрої, тобто перетворювати енергію палив на механічну. Так чи є енергетичними машинами компресори та холодильні установки? Відповідь: так.

Така техніка не використовується безпосередньо у виробництві енергії, а, навпаки, споживає її, проте вона знаходить широке застосування у видобутку енергетичних ресурсів (природний і попутний нафтові гази, газовий конденсат, нафта), у їхньому транспортуванні (ГПА), переробленні, перетворенні та розподілі, тобто має всі ознаки, вказані у визначенні терміна «енергетика».

Крім того, такі установки, по суті, є машинами, у яких відбувається вторинне перетворення енергії електричної, механічної, теплової для виконання корисної роботи (компримування газів, вироблення тепла і холоду).

Образно кажучи, такі машини є «двигунами навпаки», тобто якщо, наприклад, турбодетандерний двигун використовує енергію тиску газу для вироблення механічної енергії, то компресор використовує механічну енергію від приводу для підвищення тиску газу. Це відомо з термодинаміки як принцип оборотності теплових двигунів. Але не варто це розуміти буквально, тому що компресор може бути поганим двигуном і, навпаки, бо умови їхньої роботи специфічні.

Головною ж узагальнювальною ознакою всіх енергетичних машин є єдність теорії, заснованої на фундаментальних законах фізики, механіки, термодинаміки.

Зі сказаного вище впливає і трактування терміна спеціальності «енергетичне машинобудування», тобто роз-

роблення (створення) ефективних конструкцій компресорних машин і установок.

Сучасні компресори високого і надвисокого тиску для високопродуктивних технологічних процесів у хімічній, нафтогазовидобувній промисловості є дуже складними і високонавантаженими конструкціями (рис. 1.3). Основним параметром таких компресорів є створюваний ними тиск газів, що досягає 250–300 МПа в умовах високих вимог пожежо- та вибухобезпеки.

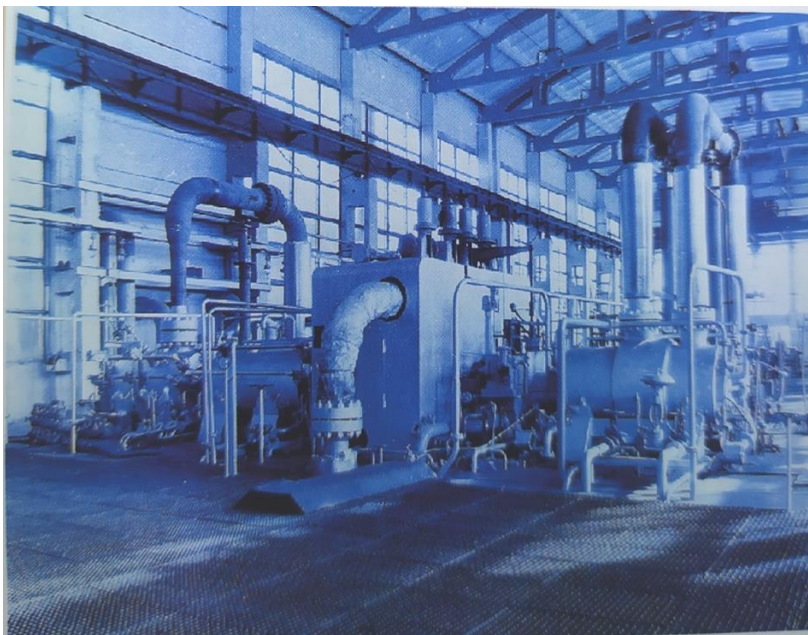


Рисунок 1.3 – Відцентровий компресор синтез-газу виробництва аміаку 433ТЦ2 з тиском нагнітання 32 МПа, потужністю 10 МВт, частотою обертання 13 000 об./хв

Отже, компресори і холодильні машини належать до класу енергетичних машин. Але чи є між ними різниця? Так є, і досить принципова: по-перше, робочі тіла різні (у компресорах – газ, у холодильних машинах – пари і рідини). У першому випадку робочий процес відбувається без зміни агрегатного стану робочого тіла, а у другому – зі зміною; по-друге, компресор – машина зазвичай одноагрегатна, а холодильна машина (установка) – багатоагрегатна (насос, компресор, випарник, конденсатор).

Сталося так, що внаслідок специфічності завдань, теорії та практики використання напрямки «холодильна техніка», «криогенна техніка» та дотична до них «вакуумна техніка» розвивались осторонь від загальної енергетики. Згодом ці напрямки трансформувалися в окрему потужну галузь, що динамічно розвивається. Тому проблематика цього спрямування тут не розглядається.

### **1.3 Проблематика досліджень енергетичних машин**

Клас енергетичних машин досить широкий і містить у собі багато типів, що істотно відрізняються між собою як за принципом дії, так і за конструкцією. Головною особливістю енергетичних машин є значний рівень потужності, що виробляється або споживається. Звідси впливає і головна вимога до таких машин – їхня висока ефективність.

У сучасному розумінні ефективність – це не лише висока економічність, але і висока надійність, тобто не тільки високий ККД, але і тривала працездатність і ресурс.

Основними чинниками, що визначають ефективність машин, є їхні високі термодинамічні навантаження (тиск

і температура) та високі силові навантаження на вузли і деталі як статичні, так і динамічні.

Оскільки енергетичні машини – це теплові машини, то їхній ККД залежить від термодинамічних параметрів середовища. Наприклад, для теплових двигунів (парові і газові турбіни, газопоршневі двигуни) ККД установок і циклу тим вищий, чим вищі вхідні параметри робочого тіла. ККД проточної частини машини, у якій відбувається перетворення енергії, визначається її газодинамічною досконалістю. Процес перетворення енергії супроводжується високими навантаженнями на елементи робочої частини. Ці навантаження зазвичай декількох видів і проявляються спільно:

- статичні – під дією внутрішнього тиску і відцентрових сил обертових деталей;
- температурні – від впливу термічної напруги;
- газодинамічні – від впливу газового потоку, що рухається з великими швидкостями;
- динамічні навантаження – від впливу дисбалансу обертових деталей і коливань та нестационарних явищ (пульсації, флатер, вихори, зриви потоку).

Усі ці явища проявляються в різних типах машин по-різному і потребують дослідження. Створення надпотужних парових турбін великої енергетики (для ТЕС і АЕС) потужністю до 1,6 млн кВт в одному агрегаті вимагало переходу на закритичні параметри ( $p = 32$  МПа,  $t = 540$  °С і вище).

Газові турбіни, що використовуються для привода газоперекачувальних агрегатів, досягають потужності

25–32 тис. кВт із температурою горіння паливної суміші до 1 000 °С.

Відцентрові компресори, що застосовуються у виробництві аміаку, стискають синтез-газ до тиску 32 МПа, споживаючи потужність 12–15 тис. кВт.

Наведені приклади енергетичних машин свідчать про високий рівень досягнутих параметрів і, відповідно, про проблемність їхнього створення.

Таблиця 1.1 дає уявлення про рівень проблем, що розв’язуються під час створення енергетичних машин різного типу.

Таблиця 1.1 – Проблематика створення сучасних енергетичних машин

<b>Проблемність</b>	<b>ПТ</b>	<b>ГТ</b>	<b>ДВЗ</b>	<b>ВК, ПК</b>	<b>ТГ</b>
Термодинаміка	+++	++	++	++	
Газодинаміка	+++	+++	+	+++	
Гідравліка	+	+	+	+	+++
Теплопередача	+++	+++	++	++	+
Міцність	+++	++	++	+++	++
Динаміка	++	++	+++	+++	++
Матеріалознавство	+++	+++	++	+++	++

Примітка: ПТ – парові турбіни; ГТ – газові турбіни; ДВЗ – двигуни внутрішнього згорання; ВК, ПК – відцентрові і поршневі компресори; ТГ – турбіни гідравлічні

У таблиці позначені рівні проблем: +++ – дуже високий; ++ – високий; + – середній. Проблемність визначається складністю завдань, розв’язуваних у межах окремих

наук, що визначають ефективність конструкцій, звичайно, не менш важливі проблеми екології, ресурсоемності, техногенності та ін. Таблиця дає лише загальне уявлення про проблематику і не претендує на повну коректність.

З таблиці 1.1 також маємо, що дослідження (а також розрахунок, проєктування) енергетичних машин, що являють собою складні технічні системи елементів, у яких відбуваються різні процеси та явища, дуже складне завдання. На практиці широко використовується метод аналізу, тобто розчленування загального завдання на окремі підзавдання, синтез яких дає розв'язок загального завдання. Наприклад, під час створення турбомашин спочатку виконують термодинамічний розрахунок теплоперепадів на корпуси, секції і ступені, за отриманими параметрами профілюють робочі органи, визначають статичні і температурні навантаження на деталі, вибирають відповідні матеріали, виробляють динамічний розрахунок конструкції тощо. Не завжди процес створення йде однозначно. Досягнення прийнятних результатів подальшого розв'язку вимагає коригування розв'язку попереднього завдання. Навіть на сучасному рівні розвитку теорії накопиченого досвіду, швидких ЕОМ процес створення нових машин тривалий і працемісткий.

Кожне із завдань поелементного дослідження становить велику складність, належить до певної галузі наук, використовує теорії і математичний апарат у вигляді математичного опису явищ на базі фундаментальних законів природознавства, і для розв'язування використовуються сучасні ЕОМ і спеціальні програмні комплекси та методики. Наприклад, під час дослідження течії робочого тіла в проточній частині машини завдання належить до гідроди-



наміки рідини, описується рівняннями течії рідини, нерозривності та енергії і розв'язується методом кінцевих елементів на ЕОМ з використанням програмних комплексів CFD (FlowVision, Ansys та ін).

У найнеобхідніших випадках виконують експериментальну перевірку отриманих результатів. Експеримент і далі залишається альтернативним способом отримання достовірної інформації. Залежно від завдання дослідження експеримент буває натурний і модельний.

Техніка експерименту за багато років отримала значний методичний і апаратурний розвиток. З'явилося безліч високоточних засобів на базі новітніх досягнень науки і техніки. Серед них такі: лазерні вимірювачі, термоанемометри, тензодатчики, оптичні прилади та багато інших. Широко використовуються системи автоматизованого ведення експерименту, системи проведення експерименту в єдиному масштабі часу, віддаленого моніторингу та ін.

У сучасному світі вчені мають потужні засоби для проведення наукових досліджень, отримання нових знань і створення нових досконаліших машин і технічних систем.

#### **1.4 Тематика наукових досліджень енергетичних машин**

Мета наукових досліджень – отримання нових знань є непорушним постулатом для фундаментальних наук. Для прикладних наук це положення трансформується в розроблення нових технологій, матеріалів, конструкцій машин і апаратів.

Енергетика – провідна галузь економіки усіх розвинутих країн світу.

Енергетичні машини перетворюють величезні кількості енергії, і до них ставляться високі вимоги з ефективності. Ключовим питанням є досягнення якомога більшого ККД, який, зі свого боку, визначається ККД робочого процесу, перетворенням енергії, що протікає в робочих органах енергетичних машин. Звідси впливає головний напрям досліджень – підвищення ефективності робочого процесу і досконалості робочих органів, у яких цей процес реалізується. Стосовно теплових енергомашин, це означає вдосконалення теплових схем і робочих частин, що працюють на газоподібних (або парах) робочих тілах.

Основними критеріями оцінювання науково-дослідних робіт є:

- проблемність (чи існує проблема);
- актуальність, тобто важливість для сучасного стану та розвитку галузі економіки;
- реалізованість з урахуванням наявності необхідних коштів і ресурсів;
- наукова новизна результатів роботи, внесок у подальший розвиток наукових знань;
- практична цінність – де і як конкретно можна на практиці використовувати результати і рекомендації роботи.

З урахуванням перерахованих критеріїв розробляється техніко-економічне обґрунтування ТЕО НДР, у якому наводяться всі необхідні доказові викладки, вартість, терміни, і період окупності витрат.

Нижче будуть розглядатися питання проведення наукових досліджень стосовно турбомашин (турбін і турбокомпресорів) як найбільш представницьких.

## Питання до глави 1

1. Дати визначення термінів «енергетика», «енергомашинобудування», «енергетична машина».
2. Дати визначення і пояснити значення поняття «енергія».
3. Навести види і джерела енергії, їхня класифікація.
4. Що таке «енергетичні машини»? Їхні види, приклади.
5. Компресорні машини як вид енергетичних машин.
6. Чим визначається проблематика досліджень енергетичних машин?
7. Методи аналізу і синтезу в дослідженнях енергетичних машин. Навести приклад.
8. Які основні характеристики (критерії) науково-дослідної роботи?
9. Які основні проблеми і тематика наукових досліджень теплових енергетичних машин (турбін і компресорів)?
10. У чому полягає суть проблеми ефективності енергетичних машин? Поясніть на прикладі компресора.

## ГЛАВА 2 РЕТРОСПЕКТИВА РОЗВИТКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Становлення основ наук

Що ж таке наукове дослідження? Існує безліч визначень. Одне з них таке: *наукове дослідження – це осмислений процес пошуку нових знань про предмети та явища довкілля з використанням засобів фізичного і теоретичного пізнання.*

Процес пізнання, нового за історію людства, зазнав істотних змін. Основним параметром процесу можна вважати співвідношення обсягів знань (у деяких одиницях) емпіричних і теоретичних досліджень. Уявлення про це дає графік на рисунку 2.1 починаючи з первіснообщинного ладу до сьогодення. Власне, початок наукових досліджень варто віднести до часу виникнення в античній період у Греції (V–IV ст. до н. е.). До цього, очевидно, можна відзначити тільки про емпіричні пізнання, спостереження: порівняння об'єктів, накопичення цих знань і перші боязкі застосування їх за допомогою створення примітивних знарядь і машин для полегшення праці (поява човнів, вітрил, коліс, луків, використання вогню тощо).

Закладення основ наук давньогрецькими вченими дало потужний поштовх у розвитку наук, для створення аналітичного апарату та, головне, перші спроби створення реальних об'єктів і, як неминуче, їхні випробовування і вдосконалення.

На цьому рубежі розвитку людство дійшло до розуміння важливості і необхідності експерименту як цілеспрямованого дійства і критерію.

Далі розвиток пішов за відомим з історії сценарієм  
антична наука → промислова революція → НТР.

Графік дає якісне уявлення про динаміку розвитку природничих наук і про співвідношення емпіричного та теоретичного знання на різних етапах розвитку цивілізації.

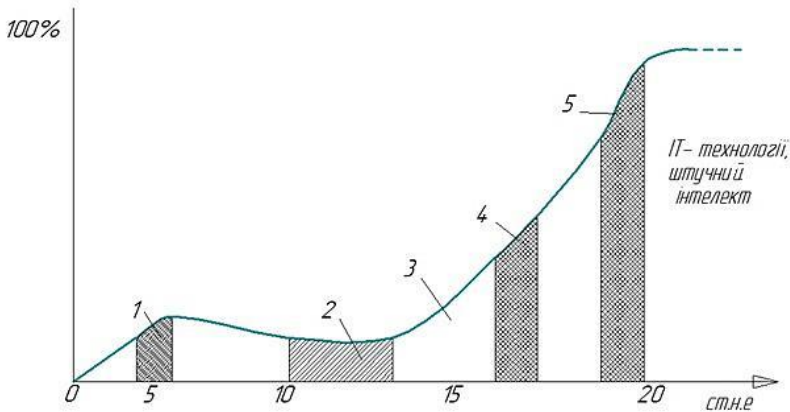


Рисунок 2.1 – Динаміка зростання наукових досліджень упродовж нової ери:

періоди: 1 – античної науки; 2 – середньовіччя;  
3 – епоха географічних відкриттів; 4 – англійська промислова революція; 5 – науково-технічна революція

Науково-технічна революція середини ХХ століття, крім оновлення основних фондів на основі нових енерго- і ресурсозберіжних технологій, принесла із собою потужний апарат – швидкі ЕОМ, які створили необхідні передумови для якісної зміни дослідницьких робіт. Це епоха заміни

від тяжкої праці людини у сфері виробництва, до заміни її праці у всіх сферах діяльності, зокрема розумовій.

XXI століття, вочевидь, надасть можливість звільнення людей від необхідності праці, оскільки стрімко розвиваються 3D-технології матеріального виробництва, роботизовано комплекси, системи штучного інтелекту, робототехніка, чому вже зараз є гідні приклади. Втілюються в життя найдивніші фантазії провидців.

## **2.2 Перспективи інтеграції наук**

Що стосується розвитку наук, то в їхній структурі також відбуваються значні зміни. Це пов'язано з тим, що вже давно пішли в минуле методи вивчення окремих ізольованих об'єктів у навколишньому середовищі. Їм на зміну прийшло комплексне, системне вивчення поведінки об'єктів у навколишньому середовищі. На зміну понять «машина», «складна машина» виникло поняття «складна технічна система і об'єкт».

Системний розгляд об'єктів зажадав залучення, крім профільних суміжних наук і знань, аналітичних апаратів.

Це призвело до об'єднання зусиль дослідників різного профілю. Відбувається інтеграція наук, їхнього взаємного проникнення, стираються грані між ними. Сьогодні вже біологія трансформувалася в генну інженерію, медицина зливається з електронікою тощо, цей процес злиття наук триває і далі. Потужно наростають темпи розвитку інтеграції наук про живі організми і технічних наук із метою створення більш досконалих технологій, аналогів природних. З'явилися нові науки та наукові напрями: біоніка,

біомеханіка, генна інженерія, кібернетика, біоенергетика, реінжиніринг доквілля тощо. Результатом є народження супернанотехнологій, робото-технічних комплексів, систем штучного інтелекту і багато іншого.

Стан економіки вимагає невідкладних заходів. Потрібна зважена, чітка програма підйому економіки і рівня життя населення.

Енергетика – основа всієї економіки. Ця галузь насамперед вимагає реформування на основі новітніх досягнень науки і техніки.

Тривають пошуки способів досягнення бажаної мети людства – технологій прямого перетворення ядерної енергії з невичерпних джерел Землі. Набирає темпу використання альтернативної енергетики – повітряних і сонячних електростанцій. Але поки що немає гідної альтернативи традиційній теплоенергетиці, а отже, й енергетичним машинам.

### **2.3 Глобальна комп'ютеризація**

Другим важливим чинником сучасного розвитку є глобальна комп'ютеризація, що пронизала всі сфери діяльності людини та відкрила гігантські можливості для праці, насамперед у сфері розумової діяльності. Сьогодні сучасний комп'ютер – надійний помічник, а все частіше – і основний виконавець у системі «людина – комп'ютер».

Гарною ілюстрацією цього проникнення ЕОМ у всі сфери не лише наукової, але й виробничої та громадської діяльності служить створення численних систем автоматичних управлінь САУ, САПР, АСУ, АСУТП та ін. АСУ

широко використовується в банківській справі, у бухгалтерському обліку тощо.

Але особливо продуктивна комп'ютеризація науково-дослідних робіт. Тут галузі застосування важко перерахувати: прогнозування поведінки об'єктів і визначення ризиків, оптимізація, планування, автоматичні системи, зокрема і для проведення експериментів.

Якщо припустити, що за результатом якогось зовнішнього впливу припиниться функціонування комп'ютерних систем, то це призведе до занепаду. Були такі прогнози на перехідному рубежі 2000 року. Вважалося, що це паралізує насамперед банківську систему. Але цього не сталося.

Безумовно, що такому бурхливому розвитку комп'ютеризації сприяли досягнення в низці галузей знань, таких як: електроніка, унікальні матеріали і нанотехнології, інформаційні мережі тощо.

Разом із процесом розвитку ЕОМ відбувався і розвиток проблеми діалогу «людина – машина», тобто розвиток програмних засобів. За півстоліття було пройдено шлях від системи двійкового програмування з ручним набиванням на перфокарти і перфострічки до появи ефективних мов автоматичного спілкування з ЕОМ, створення пакетів прикладних програм тощо. Виникла нова наука – інформатика. Все це сприяло переходу на якісно новий рівень у виконанні науково-дослідних робіт.

На жаль, ці успіхи затьмарюють антипродуктивні розробники, так зване хакерство, яке вже зараз завдає великої шкоди і відволікає фахівців від продуктивної роботи.



Необхідно відзначити, що Україна посідає високі рейтингові позиції у світі в галузі інформатики, багато інофірм користуються послугами українських програмістів.

Інформаційні технології стрімко розвиваються, стаючи однією з найважливіших рушійних сил подальшого прогресу людства в усіх без винятку сферах людської діяльності.

### **Питання до глави 2**

1. Яке співвідношення емпіричних і теоретичних досліджень у різні епохи розвитку?
2. У чому сенс промислової революції XVII–XVIII ст. і науково-технічної революції XX століття?
3. У чому сенс і необхідність інтеграції?
4. У чому сенс глобальної комп'ютеризації?
5. Успіхи і проблеми розвитку наук в Україні.

## ГЛАВА 3 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ НАУК

### 3.1 Перспективи та тенденції розвитку технічних наук

Які ж перспективи і тенденції розвитку технічних наук? Адже зроблені вже великі відкриття і винаходи, отримані фундаментальні закони і розроблені теорії. По-перше, є галузі науки, у яких ще не досліджено багато явищ і процесів, наприклад: атомна фізика, космос та ін. Нас очікує ще багато відкриттів у галузі фундаментальних наук. А в техніці? Епоха «гігантизму», тобто створення технічних машин і систем більшої продуктивності, йде в минуле. (приклад: компресори надвисокого тиску в хімічних виробництвах, суперлайнери «Конкорд» тощо). На зміну приходять «розумні» технології і машини, побудова і функціонування яких все більше наближається до природних систем як найбільш раціональних (приклад: мембранні технології в техніці, прогрес у виробництві аміаку та ін.). Такі «розумні» технології покликані різко зменшувати споживання непоновлювальних ресурсів Землі, віддаляючи катастрофічні наслідки.

По-друге, спостерігається різке підвищення якості продуктивності праці фахівців, зайнятих науковими дослідженнями, завдяки комп'ютеризації та ІТ-технологіям. У технічних науках це виражається у зменшенні обсягів експериментальних робіт завдяки розвитку методів математичного моделювання.

Розгляд цієї теми відбувається в руслі загальної концепції розвитку наук, прояву їхніх зв'язків і закономірностей. У цікавій книзі «Майбутнє науки» (Джен Бокман.

Майбутнє науки. – Москва : Астрель, 2015 – 270 с.) є глава «Плоть і комп'ютер», у якій наведені вислови професора Бікмана – завідувача лабораторії штучного інтелекту Массачусетського технологічного інституту США (1-ше місце у світовому рейтингу вузів) про перспективи розвитку науки на найближчі 50 років. У цій книзі йдеться про те, що протягом 500 попередніх років людство накопичувало факти і намагалося не завжди адекватно давати їм наукове трактування. Протягом останніх п'ятдесяти років відбулася трансформація наук на базі нових відкриттів і знань у галузі кібернетики, комп'ютеризації, генної інженерії, де нещодавно розроблювалися різні САПР, системи розпізнавання об'єктів (для визначення російських танків і літаків). Сьогодні виконуються роботи зі створення біоробототехнічних систем із задіянням не тільки аналогів, але і живих клітин, мембран ДНК-структур. За його образним висловом «ми хочемо навчитися створювати відразу стіл, замість вирощування і посадки саджанців дерева, очікування багатьох років зростання, потім спилування, транспортування, розпилювання на дошки, і, нарешті, виготовлення столу».

Чим викликана така образність вираження думки? Річ у тім, що природні живі і рослинні організми є надзвичайно раціональними структурами. Світ природи створений ідеально. До цієї недосяжної вершини необхідно прагнути, створюючи штучні технічні або, точніше кажучи, техногенні системи в інженерії, медицині, біології тощо. У всьому світі передова наука вже шукає способи, методи і засоби для досягнення цієї мети. Вражають приклади розумних роботів, протезів органів людини, що працюють від природних імпульсів живого організму та ін. Принципи побудови

біологічних структур також все частіше застосовуються в технічних методах дослідження під час аналізу складних технічних об'єктів, побудови складних алгоритмів та ін., про що буде викладено в розділі «Оптимізація складних технічних об'єктів».

Відомий у радянські часи вираз, приписуваний вченому-селекціонеру Мічуріну «ми не можемо чекати милості від природи. Взяти її в неї – наше завдання», набуває зовсім іншого сенсу. Природу треба не підкорювати, у неї потрібно вчитися доцільно використовувати ресурси. До такого розуміння місця і ролі науки людство пройшло дуже великий шлях.

Отже, сьогодні народилася і затверджується нова парадигма в розвитку науки – використання принципів побудови і функціонування біологічних організмів під час створення штучних об'єктів від інтелекту до техніки. Як відзначає Дж. Баклан, «все у цьому світі, зокрема і ми з вами, є результатом взаємодії молекул». Напрямок створення біотехнічних систем є конструювання молекулярних сполук і умов їхнього функціонування.

### **3.2 Розвиток методів теоретичного дослідження**

Розглянемо основні віхи розвитку теоретичних методів.

Розгляд цього питання варто розпочати із середини ХХ століття. До цього часу повністю сформувалися основи теорії всіх фундаментальних наук, зокрема термодинаміки, газогідродинаміки, отримано замкнуті системи рівнянь у приватних похідних, що описують робочі процеси в енергетичних машинах, а головне, виникла гостра потреба в розв'язанні безлічі проблем, що спонукають стрімкий розвиток основних галузей промисловості і, насамперед, оборонного

комплексу. Цей етап можна вважати вихідною точкою відліку розвитку сучасних наукових досліджень. Основні етапи розвитку прикладних наукових досліджень подані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розвиток методів прикладних наукових досліджень у XX–XXI ст.

<b>Етап</b>	<b>Період</b>	<b>Методики теоретичних досліджень</b>
1	До середини XX ст.	Наближені розв’язки повних систем рівнянь для ручного і механізованого рахунку
2	60-ті роки XX ст.	Більш строгі підходи з чисельним рішенням на ЕОМ 1-го покоління. Розвиток кібернетичних методів дослідження
3	70–80-ті роки XX ст.	Розв’язання складних завдань на швидких ЕОМ з алгоритмічними мовами. Поява ПК, САПР і АВТОКАД
4	90-ті рр. XX ст. – початок XXI ст.	Рішення оптимізаційних завдань із використанням програмних комплексів
5	20-ті роки XXI ст.	Розв’язання завдань про складні технічні системи з ієрархічними рівнями
6	20-ті роки XXI ст.	Завдання багаторівневого і багатокритеріального моделювання складних об’єктів із використанням нових методів оптимізації
7	Сьогодення	Комплексне моделювання завдань про складні системи на основі предметно орієнтованих підходів

У 50-ті роки ХХ ст. ще не було швидких обчислювальних засобів і методів. Існували тільки механічні обчислювальні машинки-арифмометри. Розв'язок систем рівнянь руху рідини; нерозривності; енергії; властивостей рідини загалом був *неможливий*. Широко використовувалися наближені моделі течії: струминна теорія течії; осесиметрична течія; течія ідеальної рідини; течія нестисливої рідини та ін., завдяки яким були отримані практично важливі розв'язки завдань проектування машин, хоча точність була невисока. Ситуація кардинально стала змінюватися з появою ЕОМ. Перша ЕОМ «ЕНІАК» з'явилася у 1946 р. у США, а в 1950 р. перша вітчизняна машина «МЕСМ» – в Україні. Уже ЕОМ першого покоління типу «Урал» – лампові, громіздкі, з двійковою системою програмування – дозволяли реалізовувати більш строгі чисельні рішення з використанням методів кінцевих елементів *ітерраційних* процесів для інтегрування рівнянь. Це був справжній прорив.

У 70–80-ті роки ХХ ст. ЕОМ почали бурхливо розвиватися і впроваджуватися у практику наукових організацій і КБ заводів. З'явилися ЕЦВМ 2-го і 3-го покоління (БЕСМ, ЄС) з великою швидкодією з використанням алгоритмічних мов («Алгол», «Фортран» та ін.), які набагато спростили і прискорили процеси підготовки програм і розв'язання завдань. Це був наступний крок вперед у галузі досліджень. Стало можливим розв'язувати обчислювальні завдання будь-якого розміру.

80-ті роки ХХ століття характеризуються різноманітністю мінікомп'ютерів – від настільних персональних (ПК) до

типів, що використовуються для автоматизації технологічних процесів, випробувань, бухгалтерського обліку та ін.

Одночасно з розвитком комп'ютерної техніки, мов програмування йшло накопичення бази даних, програм для розв'язування найрізноманітніших завдань, потрібних для підвищення ефективності конструкцій енергетичних машин: газодинамічні, гідравлічні, надійні, динамічні, теплові, термодинамічні та ін. розрахунки. На початку такі програми створювалися безпосередньо розробниками машин, потім відбувався обмін такими програмами, а далі виникли спеціалізовані центри з розроблення програмних продуктів на договірній основі. Згодом на наш ринок прийшли і закордонні продукти. Ці процеси сприяли виникненню нової галузі науки – IT-технології, яка стала одним з основних напрямків сучасної науки, значення якої важко переоцінити.

До кінця XX ст. були створені всі передумови для масового впровадження комп'ютерних технологій у процесі створення нових енергетичних машин у системи САПР. Відбувається процес переходу від дослідження і оптимізації окремих елементів до дослідження їхнього взаємного впливу, тобто до складних технічних систем. Цей напрямок стає магістральним у XXI ст. Звідси можна вести відлік сучасного високотехнологічного висококомп'ютеризованого системного дослідження енергетичних машин як складних технічних систем.

Можна стверджувати, що основним напрямком розвитку теоретичних методів дослідження у другій половині XX століття було розроблення та вдосконалення інструментарію на базі використання ЕОМ, що призвело до

народження і стрімкого розвитку нового напрямку науки – ІТ-технології.

Накопичений протягом століть величезний обсяг знань, засобів аналізу та досвіду їхнього застосування визначили основні методи теоретичного дослідження (рис. 3.1).

Практика сучасних досліджень продемонструвала, що найбільш всеосяжними та ефективними є методи математичного дослідження і, насамперед, математичне моделювання, можливості якого весь час стрімко розвиваються. Щодо інших методів, потрібно вказати, що вони з успіхом застосовуються в окремих галузях знань, зокрема в комбінаціях із математичним моделюванням. У наступних главах будуть наведені відомості з деяких із них.

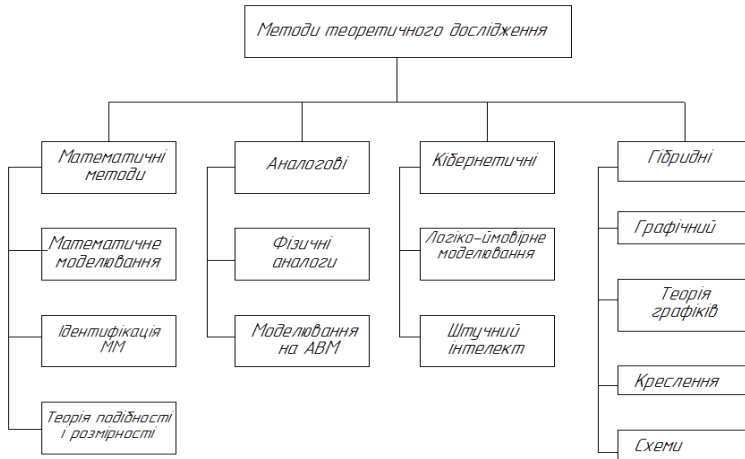


Рисунок 3.1 – Основні методи теоретичного дослідження



### Питання до глави 3

1. Що таке «гігантизм» у техніці? Його особливості та наслідки. Приклади «гігантизму».
2. Що таке «розумні технології»? Їхня принципова основа. Приклади «розумних» технологій.
3. Що таке ІТ-технології? І що викликало їхню появу? Їхня роль у сучасному житті.
4. Вплив біотехнологій на розвиток техніки. У чому сенс біотехнологій? Приклади застосування.
5. Які основні етапи розвитку методів теоретичного дослідження?
6. Коли і де з'явилися перші ЕОМ? Їхні переваги і недоліки.
7. У чому сенс кардинального повороту в галузі розвитку і застосування ЕОМ (70–80-ті роки ХХ ст.)?
8. Що таке САПР, САУ, «АВТОКАД» та ін. системи? Їхня роль у розвитку науки і техніки.
9. У чому сенс сучасного стану теоретичних методів дослідження?

## РОЗДІЛ 2

### СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### ГЛАВА 4 ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН

##### 4.1 Основні поняття методології

Відправним пунктом під час вибору теми наукового дослідження є відповідь на питання: як існує проблема?

**Проблема** – сукупність складних теоретичних і практичних завдань, розв’язання яких вимагає практика.

**Мета наукового дослідження** – всебічне вивчення об’єкта, його структури і зв’язку елементів на основі сучасних методів пізнання, отримання та впровадження в практику корисних результатів.

Проблеми породжують об’єкти під час їхнього функціонування, зміни умов, перетворення.

**Об’єкт дослідження** – матеріальна система: енергетична машина або її частина, вузол, деталь, робочий процес, тобто все те, що має певні властивості зі специфічними закономірностями і структурою. Об’єкт дослідження повинен відповідати науковому напрямку дослідження – науці або комплексу наук, у галузі яких ведуться дослідження. Це означає, що будь-який об’єкт складного пристрою під час дослідження може бути розчленований на безліч об’єктів дослідження, наприклад, технічний об’єкт.

**Приклад.** *Технічний об’єкт* – ракета, що має проточну обтічну оболонку, всередині якої відбувається згоряння палива в суміші з окиснювачем, утворюється і вивергається струмінь продуктів згоряння, що викликає реактивну тягу, долаючи гравітацію й опір атмосфери. Досягнення нормального функціонування створеної ракети породжує

безліч завдань і, відповідно, об'єктів дослідження, предметів дослідження за різними науковими напрямками.

**Предмет дослідження** – структура системи, процеси всередині її, закономірності взаємодії її елементів, їхні властивості.

**Мета прикладного дослідження** – встановлення можливостей і напрямків використання отриманих нових знань у практичній діяльності людини.

**Науковий напрямок** – наука або комплекс наук, у галузі яких ведуться дослідження.

**Тема** – зазвичай складова проблеми.

**Наукові питання** – окремі завдання, що розв'язуються в процесі дослідження.

У подальшому виконуються такі етапи:

- оцінювання економічної ефективності теми;
- планування науково-дослідних робіт;
- складання та обґрунтування бюджету.

Вище були розглянуті загальні питання і принципи наукових досліджень з орієнтацією на дослідження енергетичних машин. У подальшому ставиться мета викладання матеріалу стосовно більш конкретних додатків до проблематики енергетичних машин. З усього різноманіття проблематики дослідження таких машин акцент робиться на дослідженні робочого процесу енергомашин, а саме – течії робочого середовища (пари, газу) у проточних частинах як найбільш важливе наукоємне і представницьке.

## **4.2 Методи обчислювальної газодинаміки (CFD)**

Одразу варто зробити перевірку, чи є можливим розгляд теоретичних методів, які використовуються під час досліджень усіх типів енергетичних машин, їхнього різноманіття

та специфіки кожної з наук (газогідродинаміка, гідравліка, міцність, динаміка, теплообмін та ін.). Обмежимося лише аналізом методів теоретичного дослідження робочих процесів енергетичних машин і як найбільш представницьких – турбомашин. Цей вибір пояснюється, по-перше, складністю робочих процесів і, по-друге, одним із найбільш розвинутих аналітичним апаратом. Це стає зрозумілим, якщо взяти до уваги, що енергетичні машини: турбіни парові, гідравлічні, турбокомпресори, газотурбінні двигуни літаків, суден і наземного транспорту та ін. – основа енергетики. А енергетика в усі часи мала пріоритетний розвиток.

Оскільки, як уже зазначалося, усі теоретичні основи перебігу років закладені раніше, то на сучасному етапі розвитку досліджень у цій галузі магістральним напрямом є розвиток методів обчислювальної газодинаміки (надалі, як прийнято в науковому світі, використовується для стислості термін CFD (скорочено від англ. «calculation Fiwер dупamic» – розрахунок динаміки течії)).

Сучасні CFD-методи дуже розвинені. Існує досить багато програмних комплексів (ПК) і пакетів прикладних програм (ППП), що реалізують ці розрахунки: ANSIS, CFD, Flower і ін. Поява цих програм відкрила величезні можливості для розрахунків чисельного дослідження течій у робочих органах енергетичних машин. Бурхливо розвиваються методики застосування цих ПК для різноманітних завдань практики. Наприклад, на кафедрі технічної теплофізики СумДУ виконано цілу низку досліджень із відцентрових нагнітачів, мікротурбін, ежекторів тощо.

Висока ефективність CFD-методів, підтверджена *верифікацією* за експериментальними даними, дозволила пе-

рейти до розв'язання завдань складних об'єктів, що складаються з низки послідовних або паралельних елементів, пов'язаних єдиним робочим процесом. Це приклад системи ВРА + р. к., р. к. + л. д. відцентрового нагнітача, ежектор + водокільцевий компресор та ін. У деяких завданнях вдалося отримати результати для допоміжних трактів (так званої мікрогеометрії): течія в бічних зазорах робочого колеса, лабіринтових ущільненнях відцентрового компресора тощо.

Особливо ефективним є застосування CFD-методів для розрахунків таких технічних систем, як, наприклад, багатоступенева парова турбіна (досвід кафедри турбінобудування НТУ «ХП»).

Сучасні CFD-методи ґрунтуються на підході, у якому для отримання даних про характер течії і параметри робочого тіла в досліджуваній зоні течії чисельно розв'язують систему рівнянь Нав'є – Стокса для в'язкого газу, яка для найбільш поширених випадків турбулентної течії перетворюється на рівняння Рейнольдса, що записується в проєкціях на три координатні осі. Невідомими в цих рівняннях є величини проєкцій швидкості  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$ , а також тиск  $P$ . Для їхнього знаходження ці три рівняння повинні бути доповнені ще двома рівняннями нерозривності і рівнянням енергії. Останнє рівняння вносить ще одну невідому температуру  $T$ . Тому необхідно використовувати ще й характеристичне рівняння зв'язку параметрів стану газу, наприклад Клапейрона – Менделєєва для нестискуваного газу. Для стислих газів використовують більш складні залежності Ван-дер-Ваальса, Редліха – Квонга, Бенедикта – Вебба – Рубіна (БВР) та ін. У практичних розрахунках із використанням CFD-програм

зазвичай використовуються стандартні або імпортовані бази даних властивостей і сумішей газів.

Отже, сформована узагальнювальна математична модель течії газу. Щоб використовувати її для практичного завдання, необхідно мати об'єкт дослідження. Загалом – це зона, у якій відбувається течія газу. Проте ця зона специфічна для кожного завдання, і визначається вона конфігурацією, типом меж (нерухомі, обертальні, проникні, непроникні) конкретного об'єкта, наприклад, лопатевого каналу р. к. і л. д. або їхньої системи. Тому попередньо будується в середовищі Solid Works із подальшим імпортуванням у загальний алгоритм.

Структурна блок-схема алгоритму CFD-розрахунку робочого процесу в потоковій частині турбін або компресорів наведена на рисунку 4.1.

Після цього визначають вхідні, вихідні та граничні умови із зазначенням швидкості переміщення і проникливості меж, а також ділянок періодичності (наприклад, для лопатевих решіток). Потім ухвалюють рішення про обмеження досліджуваної зони. Наприклад, у разі осесиметричної течії в кілька градусів, або течії з покровою нерівномірністю – сектором, що перекриває кілька каналів. Варто пам'ятати, що одночасно різко знижується машинний час на ЕОМ.

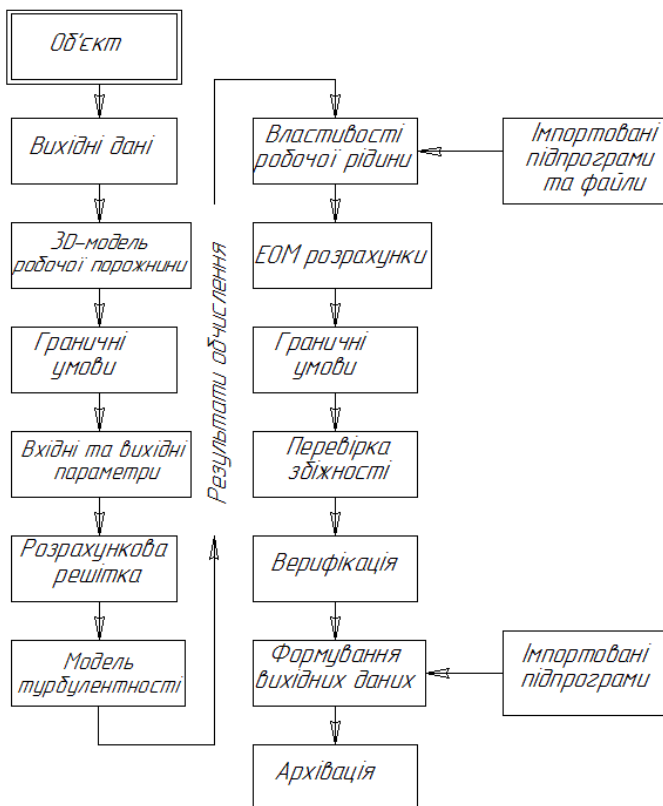


Рисунок 4.1 – Структурна блок-схема CFD-розрахунків

Дуже важливим моментом CFD-розрахунків є урахування турбулентності течії. Турбулентність – це явище, особливість якого полягає в тому, що в разі збільшення швидкості течії газу в потоці мимовільно розпочинаються фрактальні хвилі (пульсації), що виникають без наявності зовнішніх або випадкових збурень або за наявності таких. У таких умовах розв’язання рівнянь Нав’є – Стокса надзвичайно ускладнюється.

Рейнольдс запропонував враховувати вплив турбулентності за допомогою розгляду шуканих змінних як усереднених за часом значень цих величин і відповідних пульсівних складових. Але водночас з'являються додаткові невідомі в системі рівнянь. Для замикання системи вводять додаткові рівняння, які називаються моделями турбулентності. Їх досить багато. Для завдань течій у проточних частинах турбомашин найбільш поширені такі моделі: k- $\epsilon$ , k- $w$ , Белдвіна – Ломакса, Менгера (SST).

CFD-методи розрахунку ґрунтуються на використанні дискретних аналогів рівнянь системи, тобто на малих кінцевих елементах. Звідси випливає необхідність розбивки всієї досліджуваної зони на елементи за допомогою створення розрахункових сіток. Від виду і типу цих сіток істотно залежить результат розрахунку, а від кількості елементів – тривалість розрахунку.

Сітка – це сукупність певним способом розподілених умовних точок, з'єднаних між собою лініями, що розділяють зону на елементи. Для автоматичної побудови сіток існують спеціальні підпрограми – побудовники. Сітки бувають дво- і тривимірними. Зазвичай у зоні ядра потоку сітка може бути грубою (з великим розміром елементів), а поблизу стінок каналу – досить дрібною для розрахунку прилежового шару. Це називається сіткою зі згушенням.

Форма елементів, утворених сітками, може бути трикутною (двовимірною) і тетраедральною (тривимірною).

Основні параметри сіток – мінімальна довжина ребра тетраедра і значення максимального обсягу тетраедра. Потрібно вказати на важливість етапу побудови сіток, тому



що від цього значною мірою залежить точність результатів розрахунку.

Здається очевидним, що чим густіша сітка, а отже, чим більша кількість елементів сітки, тим точніші результати розрахунку. Однак варто пам'ятати, що водночас значно збільшується обчислювальний ресурс, тобто час і вартість розв'язання завдання. Обмеженням є також можливості ЕОМ, що є в розпорядженні дослідника. Полегшує завдання застосування багатоядерних процесорів і кластерів, що не завжди можливо.

На практиці використання CFD-програм керуються задаванням числа KFL, значення якого визначає раціональний крок інтегрування. Зазвичай беруть його рівним 10. Середній рівень завдань, наприклад, під час дослідження течій у ЦКМ вимагає розбивки на елементи в кількості близько  $10^5$ .

У такий спосіб завершується підготовка до розв'язання завдання. Вирішальним є фінальний етап підготовки – перевірка працездатності математичної моделі за допомогою визначення збіжності результатів ітераційних обчислень. Оцінка визначається за спостереженням залежності визначального параметра (зазвичай масової витрати) від кількості обчислювальних процедур. Необхідне сходження результатів від попередньої до подальшої ітерації (точність розрахунків) повинно досягатися за прийнятний проміжок часу. В іншому разі потрібне коригування моделі.

І нарешті, «вінцем творіння» моделі є її обов'язкові верифікації, тобто перевірка результатів за допомогою прямого порівняння з експериментальними даними.

### 4.3 Інструментарій CFD-методів

Для реалізації алгоритму розрахунку моделі необхідно вибрати CFD-вирішувач. Водночас вибрати відомий, перевірений, практичний вирішувач, що є певною гарантією достовірності одержуваних результатів. Серед відомих CFD-вирішувачів найбільш поширені у світі CFD-пакеми, ANSIS, CFX і Flow Vision. Ці пакети називаються програмним комплексом.

Програмний комплекс Flow Vision застосовується для моделювання тривимірних течій рідини і газу в технічних і природних об'єктах, а також для візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки. ПК Flow Vision ґрунтується на звичайно-об'ємному методі розв'язування рівнянь гідродинаміки і використовує прямокутну сітку з локальним подібненням твердих стінок, що обмежують потік. Для апроксимації криволінійної геометрії досліджуваної зони течії використовується технологія підсіткового вирішення геометрії. Ця технологія дозволяє імпортувати (вводити) геометрію об'єкта із систем САПР (наприклад Solid Work, Autocad) до вирішувача звичайно-елементарного аналізу. ПК Flow Vision досить простий у використанні, має дуже гарні можливості для візуалізації течії, має також і інші переваги, тому широко застосовується як у практиці досліджень, так і з метою навчання у вищій школі. ПК ANSIS CFX – це вже високопрофесійний інструмент із великими можливостями, зокрема для автоматичної побудови сітки з різною об'ємною формою елементів, з адаптацією сітки та ін. Програмний комплекс містить у собі препроцесор (CFX-Pre), вирішувач (SFX-Solver) і постпроцесор (CFX-Post) (рис. 4.2).

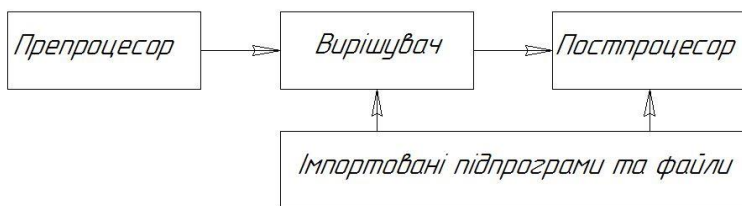


Рисунок 4.2 – Схема інструментарію CFD-розрахунків

*Препроцесор* підтримує читання розрахункової сітки і назв меж (границь) розрахункової області. *Вирішувач* SFX-Solver реалізує: обчислювальні методи, звичайно-об’ємну дискретизацію рівнянь, розв’язування повних тривимірних рівнянь Нав’є – Стокса, спільне розв’язування рівнянь моменту і маси, підтримку елементів, різних типів сіток, згущення сіток, рухливі і змінні сітки, а також моделі турбулентності і низку спеціальних допоміжних моделей (горіння, фазових переходів газів, хімічні реакції та ін.).

Програма *постпроцесора* є потужним візуалізатором результатів розрахунку і дозволяє відобразити векторні та скалярні поля, будувати плоскі і просторові лінії струму, траєкторії руху частинок, будувати графіки, таблиці та ін. Крім того, постпроцесор може визначати усереднені значення розрахункових величин, може створювати користувальницькі функції та використовувати макроси, які пишуться спеціальною мовою програмування. Макроси зазвичай необхідні під час оброблення результатів розрахунків.

У додатку А наведено приклад використання комплексу Flow Vision для дослідження течії в щілині між диском, що обертається, і стінками нерухомого кожуха, зокрема і процедуру верифікації.

#### Питання до глави 4

1. Що таке взагалі об'єкт дослідження в науці?
2. Що таке технічний об'єкт, зокрема в енергетиці?
3. Дати визначення основних характеристик наукового дослідження в енергетиці: предмета дослідження, наукового напрямку, мети дослідження, теми дослідження.
4. Що таке CFD-методи дослідження, їхня сутність і для яких завдань вони застосовуються?
5. Що таке інструментарій CFD-методів, з чого він складається?
6. Що таке 3D-модель зони течії, як описуються межі зони течії?
7. Розрахункова сітка, її призначення. З чого складається, як вона формується?
8. Модель турбулентності. У чому її сенс, які вони бувають?
9. Що таке збіжність розрахунків?
10. Що таке верифікація математичної моделі?

## ГЛАВА 5

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН

#### 5.1 Об'єкти дослідження

Практика висуває безліч запитань перед проєктувальниками і дослідниками енергетичних машин.

Енергетичні машини – складні технічні машини, у яких відбуваються термодинамічні процеси перетворення енергії, процеси течії робочих тіл у робочих органах, елементи яких схильні до статичних, динамічних і термічних навантажень. Сьогодні не існує методики комплексного розв'язування завдань розрахунку і проєктування – це справа майбутнього. Досі ще панує метод аналізу – розчленування об'єкта на елементи, пов'язані між собою. Наприклад, під час розрахування парової турбіни окремо розраховують тепловий динамічний процес у проточній частині, потім міцнісний і динамічний розрахунки елементів проточної частини (сопел, робочих лопатевих апаратів), потім міцнісний і динамічний розрахунки конструкції. Водночас вхідні і вихідні параметри для кожного розрахунку потрібно задавати і уточнювати за результатами інших розрахунків. Навіть у межах одного розрахунку (наприклад, газодинамічного) зазвичай відбувається розчленування аналізу на елементи, і розв'язки проводяться для кожного окремо. Після цього виконується об'єднання (синтез) елементів в одну систему. Водночас оптимально розраховані елементи можуть призвести до неоптимальності усїєї технічної системи.

## 5.2 Складні технічні системи

Отже, практика все наполегливіше висуває вимогу створення апарату для розрахунку і дослідження складних об'єктів як єдиної системи. З'явилося поняття складної технічної системи (СТС) як сукупності функціонально пов'язаних неоднорідних елементів в умовах змінних зовнішніх впливів.

Для розв'язування таких завдань необхідні дві основні умови:

- створення теорії розв'язування таких завдань;
- створення супер-ЕОМ і програмного забезпечення.

І те й інше – у стадії розвитку.

Уже сформульована і розвивається загальна теорія систем (ЗТС) або системологія. Ця теорія заснована Л. Бетранланфі на основі вивчення деяких біологічних об'єктів і явищ. У теорії виділено два напрямки. Мета першого напрямку – розвиток загальної концепції на базі понять «принцип системності», «системний підхід», «системний аналіз». Другий напрямок – це розвиток математичного апарату для строгого опису закономірностей формування і розвитку будь-яких систем.

ЗТС ґрунтується на трьох постулатах:

1. Функціонування систем може бути описано на основі формальних зв'язків між окремими підсистемами.

2. Організація системи може бути визначена зовнішнім фіксуванням станів тільки тих елементів, які безпосередньо взаємодіють із її оточенням.

3. Організація системи повністю визначає її функціонування і характер її взаємодії з навколишнім середовищем.

Основні принципи теорії систем:

- системність – цілісне подання об’єктів (елементів);
- релятивність – будь-яку сукупність предметів можна розглядати як систему, так і не як систему;
- універсальність – будь-яку кількість предметів можна розглядати як систему, так і не як систему в конкретних певних аспектах і фіксованих умовах.

Теоретичне дослідження СТС містить:

- аналіз фізичної суті процесів;
- формулювання гіпотези дослідження;
- побудова фізичної моделі;
- проведення математичного дослідження;
- аналіз теоретичних рішень;
- формулювання висновків.

### **5.3 Ієрархічні рівні і завдання моделювання**

По суті, алгоритм теоретичного дослідження СТС принципово не відрізняється від математичного моделювання звичайних об’єктів у загальній постановці. Однак під час дослідження складних технічних об’єктів енергетики (СТС) широко використовується метод розчленування на окремі ієрархічно зв’язані вузли (елементи). У цьому разі, організувавши розв’язування локальних завдань для кожного вузла, можна знайти розв’язок для всього об’єкта.

Як приклад розглянемо відцентровий компресор для стиснення синтез-газу у виробництві аміаку, загальний вигляд якого подано на рисунку 1.3, а його схема – на рисунку 5.1.

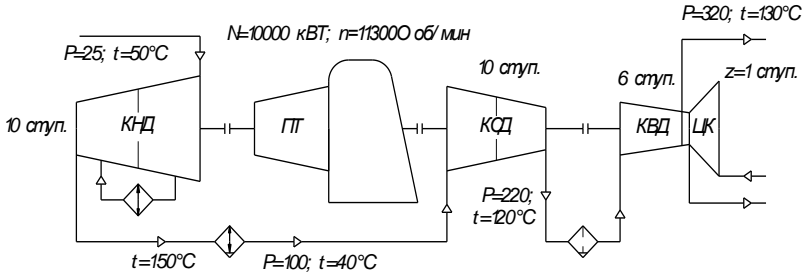


Рисунок 5.1 – Схема компресорної установки синтез-газу

Технічні характеристики компресора:

- потужність – 10 000 кВт;
- тиск нагнітанням – 32 МПа;
- обертова частота – 12 000 об./хв.

Схема компресора – одновальна, трикорпусна, багатосекційна, привід – парова турбіна. Отже, компресор має всі ознаки складної технічної системи.

Якщо ставиться завдання дослідження проточної частини такого відцентрового компресора, то ієрархічна структура об'єкта виглядає як подано на рисунку 5.2.

Відповідно розв'язувані завдання для цих елементів називаються завданнями 1-го, 2-го і 3-го рівнів, а загальне завдання називається тривірневим.

Згідно з ієрархічним поданням структури моделі СТС будується й алгоритм її розв'язування, що складається з окремих логічно пов'язаних між собою блоків. Алгоритм ММ послідовно реалізує розв'язок завдань на ієрархічних рівнях. Водночас існують прямі і зворотні зв'язки рівнів (рис. 5.3): вихідні параметри  $k$  – 1-рівня є вхідними параметрами  $k$ -го рівня (прямий зв'язок), а вихідні параметри



$k$ -го рівня є зовнішніми вхідними параметрами підсистеми  $k - 1$  тощо.

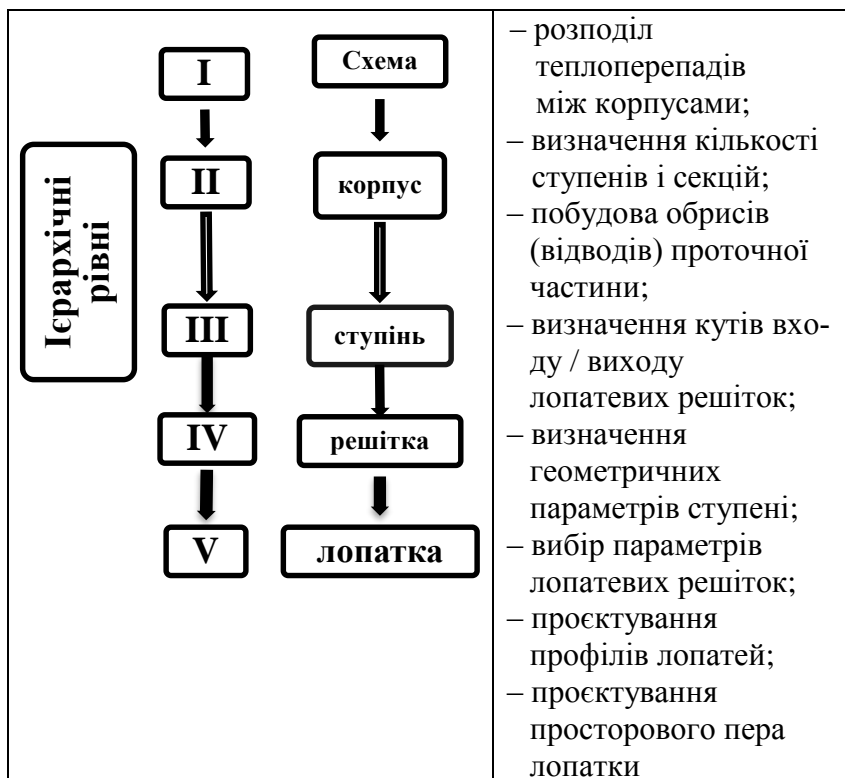


Рисунок 5.2 – Ієрархічні рівні дослідження турбомашини

Такий процес обміну інформацією між рівняннями під час розрахунків триває від першого до найнижчого рівня. За результатами такого розрахунку визначаються необхідні параметри усіх підсистем, складових СТС. Універсальність і гнучкість такої методології, що називається методологією рекурсивною, багаторівневою, особливо плідна для завдань оптимізації СТС.

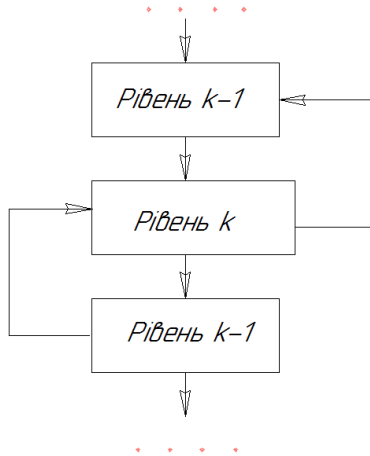


Рисунок 5.3 – Схема прямих і зворотних зв’язків підсистем багаторівневої ММ СТС

Вищенаведений підхід продемонстрований для завдань розрахунку або дослідження СТС, однак усі його положення справедливі і для завдань оптимізації, які будуть розглянуті нижче.

#### 5.4. Використання формальних мікромоделей

Досить часто в практиці різних розрахункових досліджень, зокрема і під час оптимального проектування складного технічного об’єкта, виникає необхідність отримання спрощених залежностей, що описують поведінку яких-небудь характеристик об’єкта проектування або його деталей (елементів) залежно від зміни конструктивних або режимних параметрів. Необхідність використання таких залежностей може виникати в разі складної формалізації та алгоритмізації фізичних процесів у СТС. Крім того, досить часто виникає потреба допоміжного мультидисциплінар-

ного оцінювання, наприклад, проміжних рівнів різних функціональних обмежень, значення яких можна отримати лише з використанням досить ресурсномістких математичних моделей. У цьому разі видається доцільним проводити заміну складної ресурсномісткої вихідної математичної моделі (ВММ), заснованої на моделюванні фізичних процесів, що відбуваються у складному технічному об'єкті енергетики (СТС), на якусь апроксимаційну залежність – формальну мікромодель (ФММ). Загалом макромоделюванням називають прийом заміни об'єкта дослідження залежністю типу «чорного ящика», абстрагуючись від фізичної природи явищ, що відбуваються в ньому, і виявляючи лише формальний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами (рис. 5.4). Найбільш зручно такі залежності створювати у вигляді статистичних поліномів, отримання яких засноване на обробленні результатів чисельних експериментів, проведених із використанням ІММ.

$$y(X) = \sum_{k=0}^n A_k X^k.$$

Яскравим прикладом складних технічних систем є такі енергетичні машини, як потужні парові газові турбіни та газові компресори надвисокого тиску. Під час проектування таких машин виникають численні проблеми, обумовлені тісною взаємодією впливів різних фізичних процесів на деталі та вузли робочих частин: термодинаміки, газогідродинаміки, теплопереносу, пружних і температурних деформацій, коливань та ін. Для розв'язання таких проблем

використовують одночасно розрахунково-теоретичний апарат різних галузей знань. Такий підхід є комплексним і наочно ілюструє інтеграцію наук, служить трендом сучасного дослідження складних технічних систем.



Рисунок 5.4 – Схема «чорного ящика»

Алгоритм розв'язання комплексних завдань полягає в послідовному розв'язуванні завдання кожного фізичного процесу так, що вихідні дані попереднього процесу служать входними даними наступного процесу. Цей алгоритм є циклічним за методом послідовних наближень. На жаль, навіть сучасні супер-ЕОМ не дозволяють впровадити в розрахункову практику такі численні дослідження. Дослідники вимушені спрощувати постановку завдань і їхню розмірність.

Нижче наведено обґрунтування необхідності комплексного пружногідродинамічного аналізу до технічної системи, у якій процес течії робочої рідини відбувається в умовах істотних деформацій твердих границь каналу. Такий підхід має назву ПГД-аналізу.

## Питання до глави 5

1. Охарактеризувати енергетичні машини як об'єкт дослідження.
2. У чому суть методу аналізу і синтезу стосовно дослідження енергетичних машин?
3. Що таке складна технічна система?
4. Які основні положення теорії систем?
5. Що таке ієрархічні рівні завдань дослідження технічних систем? Навести їхні приклади.
6. Скласти ієрархічну схему дослідження газодинамічної ефективності двосекційного багатоступінчастого відцентрового компресора.
7. Які завдання розв'язуються на 1-му рівні моделювання ВК?
8. Які завдання розв'язуються на 2-му рівні (рівень «ступінь»)?
9. Які завдання розв'язуються на 3-му рівні (рівень елементів ступеня)?
10. Що таке формальна мікро модель?
11. Які переваги дає застосування формальних моделей?

## ГЛАВА 6

### КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН

У попередній темі розглянута методологія оптимізації енергетичної машини (точніше її робочої потокової частини) з погляду економічності, маючи за критерій ККД. Але другою складовою ефективності є її надійність, тобто довготривала працездатність, що вкрай важливо для таких машин. Загалом надійність технічної системи визначається кількістю взаємодійних елементів і величиною та характером навантажень, що діють на ці елементи. З таблиці 1.1 маємо, що, крім газодинамічних завдань, потрібно розв'язувати декілька специфічних завдань міцності, теплопередачі, термічних і пружних деформацій, динаміки ротора та ін.

Характерним прикладом для пояснення необхідності комплексного аналізу конструкції є компресорна установка для закачування природного газу в пласт під час здобування газового конденсату, що, безумовно, є складною технічною системою. Найбільш проблемним об'єктом є корпус надвисокого тиску з параметрами 32/50 МПа (рис. 6.1.)

У практиці проектування зазвичай використовується роздільне виконання газодинамічних розрахунків і розрахунків на міцність стосовно вузлів відцентрових компресорних машин високого тиску та надвисокого тиску (ВКМ ВТ), що дозволяє отримати параметри лише в першому наближенні, тому що в першому розрахунку не враховуються деформації кордонів проточних каналів, а у другому – си-

лова реакція потоку за зміни кордонів. У деяких випадках такий підхід може спричинити суттєві неточності під час визначення конструкційної міцності, витрат потужності, витрат робочих рідин, виборі допоміжного устаткування (насосів, теплообмінників тощо), оптимальної конструкції, чистоти оброблення, допусків на виготовлення, матеріалів, методів випробувань та ін. Нарешті, такий підхід пов'язаний зі значними витратами на пошук оптимальних рішень на стадії проектування, проведення випробувань і довідних робіт.

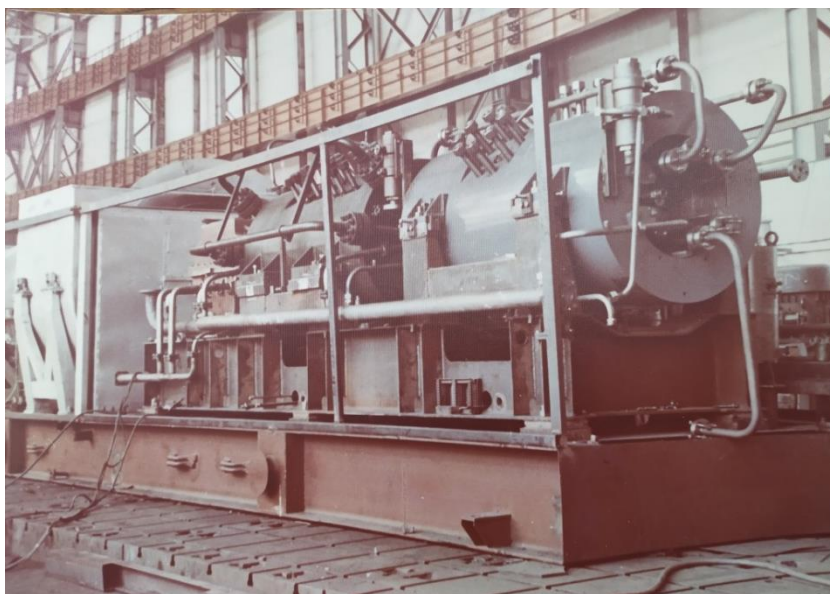


Рисунок 6.1 – Відцентровий компресорний агрегат сайклінг-процесу закачування газу в пласт для видобутку газового конденсату виробництва Сумського МНВО

Сучасний рівень розвитку механіки суцільних середовищ, теорії пружності, теорії коливань, молекулярно-кінетичної теорії рідин і газів, а також потужні засоби обчислювальної техніки дозволяють здійснювати газодинамічний і міцнісний аналізи не послідовно, а паралельно, у тісному взаємозв'язку між собою, що забезпечує ухвалення оптимального рішення на стадії проєктування. Оскільки термін «рідина» в теоретичній механіці охоплює будь-які суцільні середовища, зокрема і газ, домовимося для стислості замість термінів «гідроаеропружний», «гідроаеромеханічний» та ін. застосовувати термін «гідропружний», «гідромеханічний» тощо.

У цьому разі ВКМ ВТ можна розглядати як гідромеханічну систему – сукупність твердих пружних елементів, що утворюють проточні канали, у яких рухаються реальні рідини і газ. Водночас є істотною силова взаємодія між рідиною і пружними твердими тілами. Взаємодійні тіла системи мають задані фізичні властивості (густина, в'язкість, стисливість, пружність). Система замкнута і консервативна, тобто зовнішні щодо неї сили відсутні, поведінка системи повністю визначається внутрішніми силами.

Стан гідромеханічної системи характеризується параметрами стану: термодинамічними (тиск, густина, температура), гідродинамічними (швидкість, силові чинники), механічними (напруги деформації)  $\Pi(x_1, \dots, x_n) = 0$ . Параметри стану системи  $x_i$  формуються відповідно до законів механіки, що вважаються відомими і описуються системою рівнянь за заданих обмежень, початкових і граничних умов (станів). Під початковою умовою йдеться про стан системи в заданий момент часу, під граничними умовами –



умови непроникливості твердих меж потоку, «прилипання» потоку до меж тощо.

На основі викладеного вище завдання пружногідродинамічного (ПГД) аналізу загалом може бути сформульовано так: визначити параметри рівноважного стану гідромеханічної системи з відомими фізичними властивостями рідких і твердих тіл за заданих початкових і граничних умов. ПГД-аналіз явищ у гідромеханічній системі передбачає використання аналітичного апарату для опису властивостей робочих середовищ, течії робочих середовищ, пружних деформацій твердих тіл, тобто залучення апаратів теорій механіки рідини і пружності твердих тіл.

Загальні рівняння ПГД-аналізу можуть бути згруповані в єдину систему (для стислості запису конкретний аналітичний вид рівнянь не наводиться):

$$\left. \begin{array}{l} \text{рівняння руху в'язкої рідини;} \\ \text{рівняння нерозривності;} \\ \text{рівняння стану рідини;} \\ \text{узагальнений закон в'язкості рідини;} \\ \text{рівняння енергії;} \\ \text{рівняння руху в переміщеннях;} \\ \text{рівняння узагальненого закону Гука} \end{array} \right\}$$

Ця система еквівалентна системі з шістнадцяти рівнянь у проекції на координатній осі. Отже, завдання ПГД-аналізу зводиться до математичної задачі отримання розв'язків системи нелінійних диференціальних рівнянь у приватних похідних другого порядку щодо невідомих: тиску, густини, температури, в'язкості, складових швидкості, переміщень і напружень.

Математична теорія розв'язку таких систем розроблена недостатньо, і для них не сформульовані та не доведені

теорема існування і єдності рішення. Грунтуючись на доказах теорем для деяких приватних завдань, у практиці ап-ріорі поширюють це твердження і на інші завдання, скориставшись ним і в цьому разі.

Розв'язання такої системи навіть із застосуванням сучасних ЕОМ становить значні труднощі. Однак у цьому немає необхідності. Користуючись властивістю адитивності, гідромеханічну систему відцентрового компресора високого тиску (ВКМ ВТ) можна подати такою, що складається з більш простих елементів (підсистем), що взаємодіють між собою так, що вихідні параметри однієї підсистеми є входними параметрами для іншої. Розглянемо на прикладі циліндр (корпус) високого тиску відцентрового компресора (рис. 6.2).

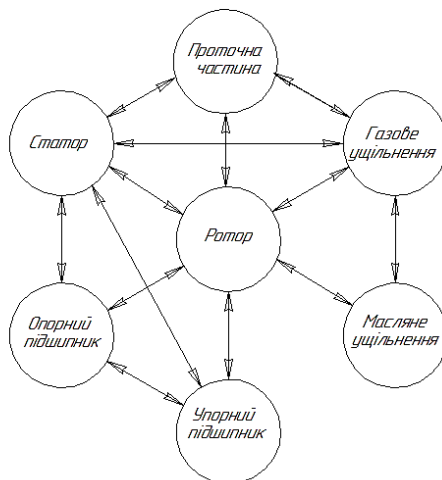


Рисунок 6.2 – Граф взаємодії елементів гідромеханічної системи – ВКМ ВТ

Нехай проточна частина і опірний підшипник – підсистеми.

Вихідний параметр підсистеми «проточна частина» – осьова сила – є вхідним параметром підсистеми «опірний підшипник».

Таких підсистем, до яких може бути застосований наведений вище аналітичний апарат, може бути виділено достатньо багато. Під час безпосереднього розгляду виявляється, що не для кожної з цих підсистем потрібно застосовувати аналітичний апарат у повному обсязі, оскільки переважними можуть виявитися окремі явища, а не їхня сукупність. Наприклад, для аналізу елементів із закінченням мастил їхня густина може бути взята постійною; під час дослідження проточної частини газ може вважатися ідеальним, а границі каналів – слабдеформованими, під час визначення статичних навантажень і деформацій процеси можуть розглядатися як квазоустановлені тощо. Така постановка питання спонукає до розгляду приватних завдань, а вихідна система рівнянь перетвориться на істотно більш прості приватні види, що описують певні типи пружногідродинамічних процесів (станів).

Доречно поставити запитання, якщо аналізу піддається певна кількість гідромеханічних систем, то для яких із них доцільно застосування ПГД-аналізу? Які ВКМ з розмірного ряду і які вузли варто піддавати ПГД-аналізу? Класифікаційні ознаки ВКМ ВД тут не можуть бути визначальними через хоча б їхню нечіткість, неконкретність. До того ж навіть ВКМ низького тиску можуть мати вузли з високим напружено-деформованим станом тощо. Для них також істотні пружногідродинамічні процеси.

Щодо цих процесів постулюємо таке положення: процеси у гідромеханічній системі є пружногідродинамічними, якщо параметри стану системи за абсолютно жорстких і пружних характеристик твердих тіл відрізняються на кінцеву величину або в аналітичному вигляді

$$\Pi(x_1, \dots, x_n) - \Pi'(x_1, \dots, x_n^1) \geq \xi \Pi(x_1, \dots, x_n); \xi \geq a,$$

де  $\Pi$  і  $\Pi'$  – вектори параметрів стану жорсткої і деформованої системи;  $\xi$  – наперед задана скалярна величина, мінімальне значення якої  $\xi = a$  відповідає нижній межі істотного для поведінки системи відхилення параметрів стану.

Для всієї сукупності параметрів стану системи (витрата, подовження корпусу, амплітуда коливань валу тощо) неможливо однозначно задати порогове значення  $a$ . У кожному конкретному випадку задане значення  $a$  повинно бути порівняно з наслідками.

З усього зазначеного впливає необхідність пошуку критеріїв, що характеризують стан ПГД-системи. За цільову функцію взята деяка функція якості системи (у широкому розумінні – економічність, надійність), що зв'язує між собою параметри, які впливають з аналізу загальної системи рівнянь

$$\Phi(x_1, \dots, x_n) = 0.$$

На основі методів подоби і розмірності початкова функція розмірних параметрів перетворена на функцію двох безрозмірних виразів цих параметрів

$$\Phi(\text{Re}, \bar{\Delta}) = 0,$$

де  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\bar{\Delta}$  – одинична деформація.

Обидва вирази характеризують окрему гідромеханічну систему. З функціональної залежності маємо важливий висновок: аналіз характеристик компресора (або його елементів) необхідно виконувати з урахуванням спільного прояву ефектів гідродинаміки і пружності. Конкретний вид функції  $\Phi$  може бути знайдений або з фізичних уявлень, або експериментально, або (для окремих випадків) теоретично.

У додатку Б наведено приклад застосування методу ПГД-аналізу для дослідження течії в щіліні простої форми, стінки якої деформуються.

Зазвичай для великих енергетичних машин такі зазори спостерігаються у вузлах ущільнень, між робочими колесами та корпусом, підшипниках тощо. Але вкрай важливими є аеро- і гідродинамічні навантаження на деталі роторів і статорів потокової частини, корпусу та кришок, опорних та упорних підшипників. Причиною цих навантажень є статичні (від тиску) та динамічні (від обертання) сили, що спричиняють деформацію та переміщення контактних і прилеглих поверхонь деталей. Такі переміщення, зі свого боку, призводять до зміни гідродинаміки течії, що може спричинити збільшення деформації і спровокувати падіння параметрів і ККД, а в разі дотику деталей, що обертаються, з нерухомими деталями призвести до аварій із тяжкими наслідками.

Так, наприклад, під час створення відцентрового компресора для сайклінг-процесу на 50 МПа такий аналіз був конче необхідний і дозволив практично уникнути терміну доводки як на заводському стенді, так і під час пусконалаштування в промислових умовах.

### **Питання до глави 6**

1. У чому сутність комплексного підходу до аналізу конструкції або процесів у складних технічних системах?
2. На прикладі відцентрового компресора високого тиску поясніть необхідність такого комплексного підходу.
3. У чому проявляється інтеграція під час проведення комплексного аналізу?
4. Як досягається оптимізація конструкції машини під час використання комплексного аналізу?

### **РОЗДІЛ 3**

## **ДЕЯКІ СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН**

### **ГЛАВА 7**

## **ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН**

### **7.1 Постановка завдання оптимізації**

У ХХ столітті в епоху розвинутого технократизму все гостріше поставало питання вдосконалення конструкцій і раціонального використання енергетичних машин, потужність яких невпинно зростала. Зростали і масштаби використання природних ресурсів: корисних копалин, прісної води, деревини тощо. Поступово першорядною стає вимога економічності енергетичних машин як перетворювальних видів енергій у великій кількості. Вчені та конструктори вдосконалюють наявні та розробляють нові методики розрахунків і нові конструкції машин. З появою ЕОМ стає можливим виконувати варіантні розрахунки конструкцій і вибирати з них кращі. Дійсно революційним змінам сприяла поява супершвидкісних ЕОМ і програмних комплексів. Став можливим автоматичний пошук найкращого варіанта з усіх можливих. Така процедура одержала назву «оптимізація». Спочатку цей метод використовувався для оптимізації окремих процесів, деталей і вузлів машин, а згодом став поширюватися на агрегати, системи і навіть машини. Водночас складність і тривалість розрахунків стрімко зростає. Саме цей етап розвитку характеризує сучасне стано-

вище наукових досліджень у галузі енергомашинобудування.

З іншого боку, невідмінно зростають вимоги ринку до енергетичних машин – це вже не лише економічна ефективність, а й вимоги до охорони довкілля, ресурсозбереження та ін. Виникають завдання багатокритеріальної оптимізації. Основні критерії такі:

- економічна ефективність (ККД);
- надійність і довготривалість;
- ресурсоемність;
- екологічність;
- ергономіка;
- безпечність.

Зрозуміло, що виконання усіх цих критеріїв одночасно – поки що завдання нездійсненне та й навряд чи взагалі можливе. Це проблема майбутнього.

Традиційним методам багатоваріантних розрахунків конструкцій машин, що проводяться з метою вибору найкращого варіанта, прийшли на зміну методи моделювання та оптимізації складних технічних систем. Цьому сприяли успіхи в галузі комп'ютерної техніки, обчислювальної математики, програмування. Стосовно проблем енергомашинобудування, великий внесок у розвиток теорії оптимального проєктування турбомашин зроблено Харківською науковою школою і, насамперед, роботами кафедри турбобудування НТУ «ХП» під керівництвом проф. А. В. Бойка. Усі основні положення, методологія та інструментарій цілком застосовувані і для інших типів енергетичних машин, зокрема для компресорів.



Насамперед мова йде про оптимізацію з використанням методів CFD. На цьому етапі розвитку теорії не можливо розв'язувати завдання оптимізації енергетичної машини загалом, з урахуванням її численних вхідних і вихідних параметрів, складної конфігурації зони течії, неоднозначності функції мети. На цьому етапі розглядається оптимізація головного вузла, у якому відбувається робочий процес турбомашини – це її проточна частина. Її досконалість визначає ефективність машини загалом. Інакше кажучи, мова йде про аеродинамічну оптимізацію проточної частини. Загалом проточна частина формується поряд із ступенями. Для парової або газової турбіни ступінь складається з напрямного апарата + робоче колесо, для осьового чи відцентрового компресора – з робочого колеса + дифузор. Досліджувана проточна частина (ПЧ) являє собою зону, обмежену входом і виходом і зовнішніми обрисами, усередині якої розташовуються нерухомі та обертові лопатеві решітки. Завданням оптимізації ПЧ є вибір найкращої форми геометрії (діаметри, хорди і кути входу / виходу лопаток, форми профілів тощо) стосовно заданих режимних параметрів (витрата, тиск входу / виходу, температура робочого середовища, частота обертання, в'язності робочого середовища).

Отже, у такому контексті завдання оптимізації ПЧ турбомашини зводиться до визначення визначальних геометричних параметрів, що забезпечують оптимальну ефективність ПЧ на задані режимні параметри.

У математичних термінах це можна описати так. Якщо сукупність усіх геометричних параметрів, істотних для цього завдання, позначити вектором  $\vec{X} (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , сукуп-

ність режимних параметрів вектором  $\vec{Y} (y, y_2, \dots y_m)$ , а критерієм ефективності взяти, як це здебільшого робиться, ККД ПЧ, то умовна функція може бути виражена як

$$\eta = \eta(\vec{X}, \vec{Y}),$$

а критерій оптимізації

$$\max \eta(\vec{X}, \vec{Y}).$$

## 7.2 Методи оптимізації

Відомі такі методи оптимізації:

- 1) метод прямого перебору варіантів;
- 2) методи градієнтного пошуку;
- 3) метод послідовного квадратичного програмування;
- 4) метод деформованого багатогранника – метод Нелдера – Міда;
- 5) генетичний алгоритм;
- 6) метод випадкового пошуку (Монте-Карло).

**Метод прямого перебору** передбачає суб'єктивний набір варіантів, у яких вибирається за певними критеріями кращий, але не факт, що він – найкращий із можливих.

**Метод градієнтного спуску** – один із перших строгих методів обчислювальної математики, передбачає пошук точки мінімуму (або максимуму на багатовимірній поверхні функції відгуку  $y = F(x_1, x_2, \dots x_n)$ , що і є пошуковим рішенням. Недоліком методу є не гарантування визначення точок глобальних мінімуму або максимуму функції.

**Метод послідовного квадратичного програмування (SQP)** передбачає механізм більш точного визначення глобальних точок. Недоліками методу є незбіжність за умови великого віддалення початкової точки від точки оптимуму, а також великий обсяг обчислень.

**Метод Нелдера – Міда** відомий як симплекс-метод, що передбачає використання деякого обчислюваного симплексу, який певним способом послідовно переміщується і деформується навколо точки екстремуму. Кількість варійованих параметрів не більше ніж 6.

**Генетичний алгоритм** оптимізації – метод глобального пошуку за допомогою випадкового підбору, комбінування і варіації потрібних параметрів із використанням механізмів, аналогічних біологічній еволюції: моделювання процесів схрещування, мутації і селекції заданого набору особливостей до виконання критерію зупинення алгоритму.

Під особливостями йдеться про набори варійованих параметрів, а критерій відбору – значення цільової функції. Метод вимагає великої кількості особливостей і багато часу на оптимізацію.

**Метод Монте-Карло** (випадковий метод) позбавлений недоліків попередніх методів, особливо ефективний для великої кількості параметрів. Але вимагає десятків тисяч обчислень цільової функції. Тому не застосовується в разі CFD-розрахунків. Щоб цього уникнути, використовуються квазівипадкові послідовності чисел, що унеможливорює кластеризацію завдяки більш рівномірному розподілу точок у досліджуваній області пошуку екстремуму.

Методи планування експерименту дозволяють отримати оппромаксимувальні залежності у вигляді квадратичного полінома, який можна використовувати для подальшої оптимізації та знаходження глобального оптимуму. Крім того, такі залежності використовують як формальні моделі окремих елементів об'єкта для спрощення завдань оптимізації складного об'єкта (системи).

Наведені в розділах 5 і 6 відомості дають лише загальне уявлення про напрямки сучасного розвитку теоретичних досліджень енергетичних машин. Досі невідомі спроби розв'язання завдання оптимізації в загальній цілісній постановці внаслідок багаторозмірності. Але тренд такого напрямку твердо визначився.

### **7.3 Деякі способи зменшення розмірності завдань оптимізації**

Складність оптимізації геометрії ПЧ полягає в її багаторозмірності: усі поверхні, що обтікають потоком робочого тіла зазвичай мають просторову 3-вимірну форму. Необхідно залучати математичний апарат аналітичної геометрії для якомога більш спрощеного, але коректного опису таких поверхонь параметричними залежностями, що дозволяє легко і просто управляти формою тієї чи іншої поверхні, задаючи раціонально (випадково) значення керівних параметрів, домагаючись отримання глобального оптимуму.

Одним із ефективних способів управління формою поверхні є використання кривих Без'є. Крива Без'є дозволяє досить легко і просто управляти (тобто змінювати) її плоскою або просторовою формою за мінімальної кількості

ті опорних точок (вершин). Залежно від вихідної форми тіла і завдання дослідження застосовуються криві Без'є 1-го, 2-го і  $n$ -го порядку. Більш високий порядок кривих забезпечує велику гнучкість у формуванні потрібної поверхні. Наприклад, якщо ставиться завдання оптимізації форми конфузора із заданими діаметрами входу і виходу, то криві Без'є використовують як утворювачі конфузора, а як опорні точки кривих Без'є беруться точки з координатами входу і виходу з конфузора і додатково – одна, дві, або три «керувальних» точки (згідно з порядком кривих). Задаючись певним способом координатами цих точок, можна домогтися зміни форми утворюваного конфузора в широких межах (рис. 7.1). Водночас повинні бути розумні обмеження. Для кожного з варіантів розв'язуються CFD-завдання з визначення мінімуму гідравлічних втрат. Існує низка інших прийомів і підходів до розв'язання таких завдань. Наприклад, використання методу «золотого перетину», проілюстроване в додатку А.

Такий підхід істотно спрощує багатовимірне завдання, приводячи його до раціональної кінцевої розмірності. Тепер оптимізацію, тобто пошук найкращого поєднання геометричних і режимних параметрів, потрібно проводити в багатовимірному полі зміни цих параметрів, яке задається заздалегідь за допомогою різних обмежень. Суть процесу полягає якраз у пошуку координат оптимальної точки, що є пошуковим результатом завдання оптимізації. Але алгоритм такого пошуку вельми не простий.

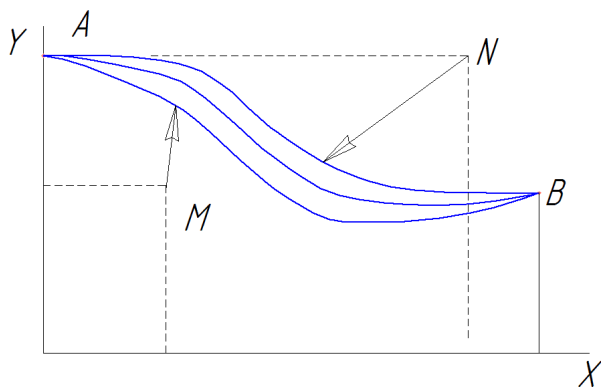


Рисунок 7.1 – Схема управління формою утворювачів каналу конфузора за допомогою кривих Без'є ( $M, N$  – «керівні точки»)

Головна вимога до алгоритму – надійне знаходження саме абсолютного екстремуму на багатовимірній поверхні цільової функції, що має безліч локальних екстремумів. Щоб не «заблукати» в цьому полі і не пройти бажаний екстремум, запропоновано низку простих і «хитромудрих» алгоритмів, які розглянемо нижче.

Для розв'язання багатомірних завдань оптимізації зроблена низка програмних комплексів, одним із вдалих є програмний комплекс багатокритеріальної оптимізації IOSO NH, запропонований компанією «Сігма технологія» РФ.

IOSO NH застосовується для підвищення ефективності складних технічних об'єктів, технологічних процесів на основі пошуку їхніх оптимальних параметрів. Дозволяє зменшити затрати і терміни дослідження.

Основне призначення цього програмного комплексу – звільнення проектувальника чи дослідника від достатньо складного і вкрай трудомісткого процесу пошуку оптима-

льних проєктних параметрів системи, які одночасно задовольняють велику кількість іноді суперечливих вимог.

Миць і гнучкість алгоритмів оптимізації IOSO NH дають досліднику можливість розв'язувати завдання оптимізації, які раніше не ставилися через трудомісткість і складність їхніх розв'язків.

Наявність математичних моделей, програмних комплексів створення об'єктів чи проведення модельних розрахунків (якими б повними і точними вони не були) не є достатньою умовою успішного проєктування і модифікації сучасних технічних і інших систем. Для створення конкурентоспроможних зразків необхідна інтеграція математичних моделей, додатків моделювання або ж реального об'єкта з пошуковими методами дослідження в межах єдиного «оптимізаційного середовища».

IOSO NH має широку цільову аудиторію, застосовується в різних галузях: аерокосмічній, автомобільній, нафтогазовій промисловості, економіці тощо. Використовується для:

- підвищення ефективності технічних систем і технологічних процесів;
- визначення оптимальних законів управління складними пристроями;
- верифікації математичних моделей об'єктів за результатами експериментів.

## **Питання до глави 7**

1. Що таке оптимізація завдання моделювання складного технічного об'єкта?

2. Дати визначення параметрів, чинників, рівнів і критеріїв оптимізації складних технічних об'єктів?
3. Як розуміти визначення багатомірності і багаторівневості завдання оптимізації?
4. Як відбувається побудова ієрархічної оптимізації?
5. Що таке формальна мікро модель у завданнях оптимізації?
6. У чому полягає роль і переваги використання формальних макромоделей у завданнях оптимізації?
7. Перерахувати основні методи оптимізації і дати їхню характеристику.
8. Описати суть застосування кривих Без'є для оптимізації форми утворюваних каналів?



## ГЛАВА 8

### КІБЕРНЕТИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 8.1 Загальні відомості

У попередніх главах йшлося про математичне моделювання об'єктів на основі фізичних законів, що описують процеси в об'єкті, наприклад, течія рідини в потоковій частині, напруженодеформаційний стан елементів конструкції та ін. Такі моделі називаються «прозорими». Але в реальних складних технічних системах спостерігається багато різномірних процесів, до того ж таких, що впливають один на одного. У таких умовах об'єкт може бути описаний фізичними уявленнями лише частково. Їх потрібно доповнювати якимось емпіричними або гіпотетичними співвідношеннями. Такі моделі мають назву «*напівпрозорі*». А якщо досліджується об'єкт із невідомою структурою і внутрішніми процесами, то модель такого об'єкта має назву «*непрозора*», або «чорна скринька». Саме ці дві останні моделі є предметом дослідження кібернетичними методами.

Кібернетика – це наука про загальні закономірності процесів управління і зв'язку в організованих системах (машин, живих організмів і суспільства). Під організованими системами йдеться про системи, у яких внутрішні процеси підкорюються деяким, зазвичай невідомим, закономірностям. Отже, енергетичні машини є організованими технічними системами. Для дослідження їх використовуються кібернетичні методи.

За допомогою кібернетичних методів розв'язується широке коло завдань дослідження технічних об'єктів:

- моделювання об'єктів і процесів;
- ідентифікація матмоделей;
- проектування об'єктів;
- доведення технічних об'єктів;
- складні вимірювання;
- програмування.

## 8.2 Кібернетичне моделювання

Кібернетичні методи дослідження є більш загальними, ніж традиційні. Використання кібернетичних моделей дозволяє формувати завдання оптимізації, використовувати недостатньо коректну інформацію, поєднувати інформацію з різних джерел і різних авторів та ін.

### 8.2.1 Кібернетичне уявлення об'єкта

Реальний об'єкт або процес зображують у вигляді схеми на рисунку 8.1, де  $x$  – вхідні, а  $y$  – вихідні параметри.

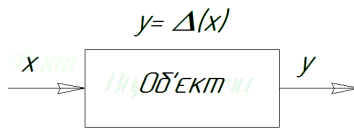


Рисунок 8.1 – Схема кібернетичного об'єкта

$A(x)$  є оператором перетворення вхідних параметрів на вихідні  $A(x) = y$ . Оператор  $A$  – це деякий алгоритм, який, по суті, і є формальною моделлю об'єкта або процесу, повною мірою наближений до реального об'єкта.

## 8.2.2 Модель «чорної скриньки»

Чорна скринька – термін, що використовується для позначення системи, внутрішній пристрій і механізм роботи якої вкрай складні, невідомі чи неважливі в межах цього завдання. «Метод чорної скриньки» – метод дослідження таких систем, коли замість властивостей і взаємозв'язків складових системи вивчається реакція системи загалом на змінні умови. Підхід чорної скриньки сформувався в точних науках (у кібернетиці, системотехніці і фізиці) у 20–40 роках ХХ століття і був запозичений іншими науками (насамперед біхевіоретичною психологією).

### *Модель чорної скриньки*

Система, яку репрезентують як «чорну скриньку», розглядається як така, що має якийсь «вхід» для введення інформації і «вихід» для відображення результатів роботи, водночас процеси, що виконуються в процесі роботи, спостерігачу невідомі. Передбачається, що стан виходів функціонально залежить від стану входів.

Канонічне уявлення чорної скриньки – це повний опис її функцій. Два чорних ящики з однаковими канонічними уявленнями вважаються еквівалентними.

Знання, одержані від об'єкта за методом чорного ящика, не дозволяють одержати інформацію про його внутрішню побудову і внутрішні механізми системи.

Цей метод застосовується для розв'язування завдань моделювання керувальних систем, в інженерній психології – для нормального опису діяльності оператора і побудови його математичних моделей.

Для розв'язування завдань типу «чорна скринька» використовується принцип «мінімаксу» (принцип Потрягіна), суть якого в такому.

«Мінімакс» – правило ухвалення рішень, що використовується в теорії гри, теорії ухвалення рішень, дослідженні операцій, статистиці і філософії, мінімізації можливих втрат для того, хто ухвалює рішення, не можна запобігти в разі розвитку подій за найгіршим для нього сценарієм.

Вивчення системи за методом чорної скриньки зводиться до спостереження за нею і проведення експериментів зі зміни вхідних даних, водночас спостерігаючи за реакціями системи на зовнішні впливи, досягається певний рівень знань про досліджуваний об'єкт, що дозволяє здійснювати прогнозування поведінки «чорної скриньки» за будь-яких заданих умов.

У математиці принцип «мінімаксу» використовується в завданнях наближення функцій алгебраїчними поліномами, у завданнях нелінійного програмування.

Під час дослідження технічних систем типу «чорної скриньки» використовують метод ідентифікації. Суть методу у використанні емпіричних (експериментальних) даних функціонування об'єкта одержати формальну (не фізичну) математичну модель у вигляді полінома. Важливо вказати, що таке кібермоделювання може проводитися в єдиному масштабі часу, тобто, реєструючи вхідні параметри об'єкта, одночасно обробляти їх на ЕОМ і прогнозувати можливі сценарії розвитку події. Це вкрай важливо для недопущення кризових або катастрофічних подій у таких дуже небезпечних об'єктах, як атомні електростанції та підводні човни, ракетні комплекси та ін.

### 8.2.3 Алгоритм ідентифікації моделі

Вважається, що існує достатньо велика кількість експериментальних даних за характеристиками однорідних

об'єктів (або процесів) за різних значень параметрів (режимних і геометричних). Завдання полягає у встановленні явної функції залежності характеристики об'єкта від параметрів у вигляді лінійного полінома типу

$$A(\vec{x}, \vec{y}) = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + \dots + v, y + v_2y_n + \dots, \quad (8.1)$$

де  $a_1, a_2, \dots, v_1, v_2, \dots$  – невідомі коефіцієнти, які мають бути визначені такими, що мінімізують відхилення значень функції  $A(\vec{x}, \vec{y})$  від експериментальних значень. Для цього рівняння (8.1) записується для кожного експерименту з конкретними реальними значеннями параметрів  $x$  і  $y$ . Водночас кількість рівнянь повинна бути більшою, ніж кількість невідомих коефіцієнтів  $a$  і  $v$ . Отже, одержана система лінійних рівнянь щодо невідомих коефіцієнтів. Одержані рішення система (коефіцієнтів) підставляються в поліном (1) і в такий спосіб маємо ідентифіковану математичну модель об'єкта (процесу). Приклад такого моделювання наведено в додатку В.

Варто зазначити, що такий метод можливо використовувати для ідентифікації апромаксіційних поліномів під час оброблення результатів експериментальних досліджень, проведених згідно з планами факторних експериментів (ПФЕ).

### Питання до глави 8

1. Що означають поняття «кібернетика», «кібернетичний підхід»?
2. Які завдання підлягають кібернетичним методам і чому?

3. Які назви мають кібернетичні моделі і чому?
4. Що таке кібернетична «чорна скринька»?
5. У чому сенс методу «мінімаксу»?
6. Що означає процедура ідентифікації?
7. Які передумови повинні бути для виконання ідентифікації?
8. Який математичний апарат використовується для ідентифікації?
9. Які недоліки має метод ідентифікації?

## Список використаних джерел

1. Бондаренко Г. А. Основы научных исследований в энергетике : уч. пособие / Г. А. Бондаренко. – Сумы : СумГУ, 2013. – 202 с.
2. Бойко А. В. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин : учебник для вузов / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко. – Харьков : Вища школа, 1989. – 217 с.
3. Бойко А. В. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации : монография / А. В. Бойко, А. П. Усатий, А. С. Руденко. – Харьков : Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 220 с.
4. Основы научных исследований : учебник для вузов / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др. – Москва : Высшая школа, 1989. – 400 с.
5. Соложенцев Е. Д. Управление риском и эффективностью в экономике / Е. Д. Соложенцев. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2000. – 259 с.
6. Сусуму Сато, Хиромику Кумимото. Реинжиниринг окружающей среды : монография / С. Сато, Х. Кумамото. – Санкт-Петербург : Бизнес-пресса, 2002. – 240 с.
7. Селезнёв Ю. В. Системный подход к исследованию термогазодинамических процессов и циклов : монография / Ю. В. Селезнёв. – Харьков : Изд-во Харьковского отделения «Вища школа», 1981. – 144 с.
8. Бойко Л. Г. Численное исследование газодинамических параметров высоконапорных центробежных компрессорных ступеней : монография / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева. – Харьков : ДИСА плюс, 2015. – 144 с.
9. Джон Бокман Будущее науки : перевод с англ. языка / Джон Бокман. – Москва : Астрель, 2015. – 270 с.

## ДОДАТОК А

Дослідження течії між диском, що обертається,  
та нерухомим кожухом із використанням  
програмного комплексу Flow Vision

Виконаємо розв'язок завдання із застосуванням програмного комплексу FlowVision, що дозволяє розглядати стаціонарну, осесиметричну течію в'язкої стискуваної рідини. Розглянуті розрахункові схеми «диск у кожусі» (рис. А.1 а) і «робоче колесо у відцентровій компресорній ступені» (рис. А.1 б) наведені в роботі.

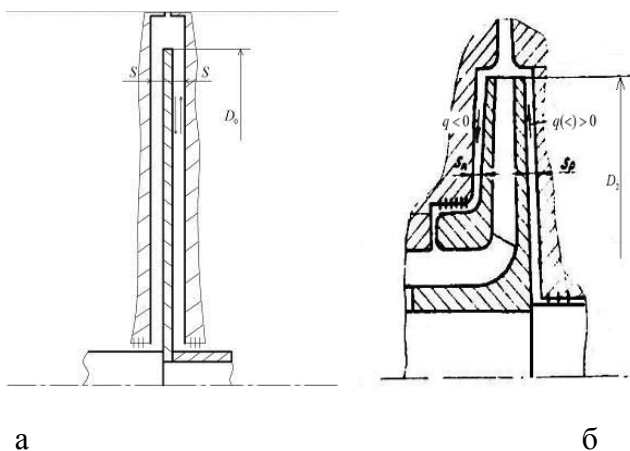


Рисунок А.1 – Диск у кожусі (а) і робоче колесо  
в ступені відцентрового компресора (б)

*Мета дослідження* полягає в розробленні та перевірці коректності моделі розрахунку розподілу тиску по радіусу дисків на основі комплексного чисельного моделювання течії в бічних зазорах диска і робочого колеса.

*Об'єкт дослідження* – течія в бокових зазорах між обертовим диском та корпусом (кожухом).



*Предмет дослідження* – розподіл тиску вздовж радіуса диска за різної величини радіального перетікання.

Критерії результатів досліджень бралися ідентичними. Розподіл тиску подано у вигляді графічних залежностей безрозмірних величин  $\overline{\Delta p} = f(\bar{r})$ ,

де  $\overline{\Delta p} = \frac{D_o - D}{\rho u_o^2}$  – відносна величина тиску;

$\bar{r} = \frac{r}{r_o}$  – відносний поточний радіус.

Індексом «0» відзначені значення на зовнішньому радіусі диска (або колеса).

Як параметр, що визначає витрату газу в зазорі між обертовим диском і стінкою корпусу, взята безрозмірна витрата  $\bar{q} = \frac{q}{\pi \cdot r_o^2 \cdot u_o^2}$ ,

де  $q$  – витрата протікання через зазор між диском і корпусом;

$u_o$  – колова швидкість диска;

$r_o$  – радіус диска.

При  $\bar{q} < 0$  – течія до центра;  $\bar{q} > 0$  – течія від центра, а  $\bar{q} = 0$  відповідало повній герметичності ущільнень.

А як параметр зазору взято співвідношення  $\bar{S} = \frac{S}{r_o}$ ,

де  $S$  – ширина зазору.

Дослідження проведені при числах Рейнольдса  $Re = \frac{\omega \cdot r_o^2}{\nu} = (3 \dots 6) \cdot 10^5$ , що відповідає розвиненому турбулентному режиму.

Згідно з кресленнями рисунка А.1 в середовищі Solid Work створена 3D-модель зони течії (рис. А.2).

Сформульовані граничні умови поверхонь: нерухомі (корпус, кожух) та обертові (диски).

Задані вхідні та вихідні параметри. Обтічні поверхні взяті аеродинамічно гладкими, турбулентність за моделлю  $k - \epsilon$ . Для перевірки правильності отриманих рішень проводилося зрівняння з експериментальними даними для схем.

Виконано вибір розмірів комірок обчислювальної сітки та її адаптація в зонах складної течії. Здійснено також оцінювання схожості результатів послідовних наближень розрахунків. Далі потрібно провести верифікацію за допомогою порівняння з експериментальними даними.

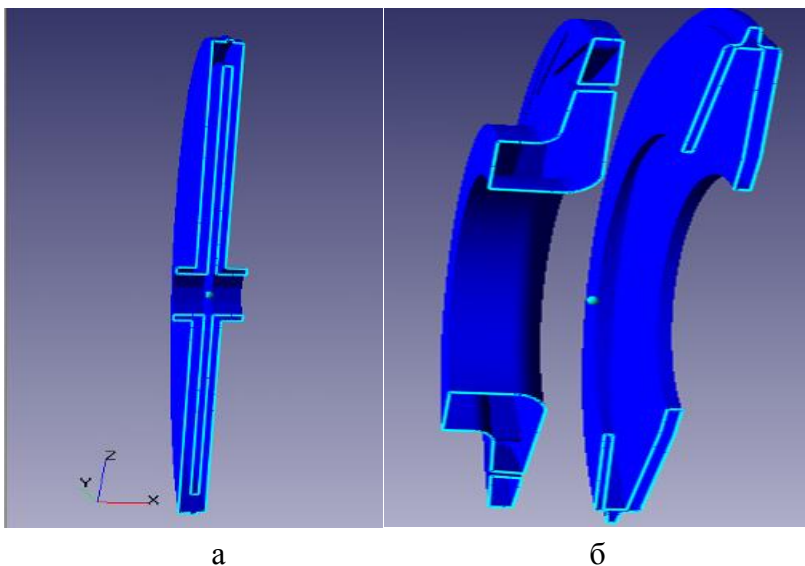


Рисунок А.2 – Тривимірна модель диска в кожусі (а) і тривимірна модель проточної частини ступені (б)

На першому етапі проведено чисельне дослідження полів тиску для класичної схеми «диск у кожусі». Розроблена параметрична модель повністю відповідала експерименталь-

ній моделі (рис. А.2 а і б). Використана рівномірна сітка (35 x 35 x 35) з локальним подібненням у зазорах між обертовим диском і кожухом. Збіжність розрахунку визначалася рівністю масових витрат на вході і виході із зони течії (перерізу у втулки і в периферії диска).

Деякі результати дослідження наведені на рисунку А.3. Насамперед потрібно відзначити досить задовільний якісний і кількісний збіг розрахункових і дослідних даних у всьому діапазоні досліджуваних параметрів. Деякі відмінності спостерігаються лише у привтулковій зоні для випадку безвитратної течії, що пов'язано з різницею граничних умов заданого і реалізованого в досліді.

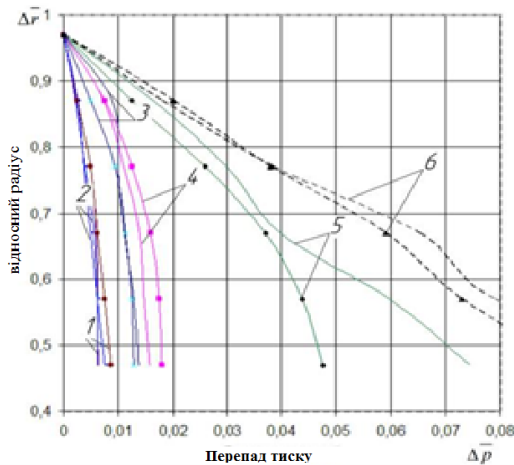


Рисунок А.3 – Розподіл відносного тиску диска по радіусу,  $\bar{S} = 0,03$ , при течії від центра ( $\bar{q} > 0$ ) і до центра ( $\bar{q} < 0$ ):

1 –  $\bar{q} = 26,4 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $\bar{q} = 28,7 \cdot 10^{-4}$ ; 3 –  $\bar{q} = 20,5 \cdot 10^{-4}$ ;  
 4 –  $\bar{q} = 14,1 \cdot 10^{-4}$ ; 5 –  $\bar{q} = 0$ ; 6 –  $\bar{q} = -11,63$   
 (точками указані експериментальні дані)

Найцікавіші результати моделювання течії в зазорах для робочого колеса відцентрової ступені. Дослідження проводилися стосовно модельної кінцевої ступені маловитратно-го відцентрового компресора (рис. А.1, б) для двох робочих коліс із кутами виходу лопаток робочого колеса  $\beta_{л2} = 55^\circ$  і  $32^\circ$ , випробуваних автором роботи. Тривимірна модель досліджуваної ступені наведена на (рис. А.2, б). Розрахункова сітка  $35 \times 35 \times 35$  з адаптацією в зазорах до  $0,4 \times 0,6 \times 0,6$ . Число KFL дорівнює 10.

Принциповою відмінністю цього завдання є той факт, що гранична умова на зовнішньому діаметрі колеса формується закруткою потоку  $Cu_2$  на виході з лопаток, яка для коліс різної напірності різна. Істотною є і несиметричність геометричної форми і характер течії в передньому і задньому бічних зазорах.

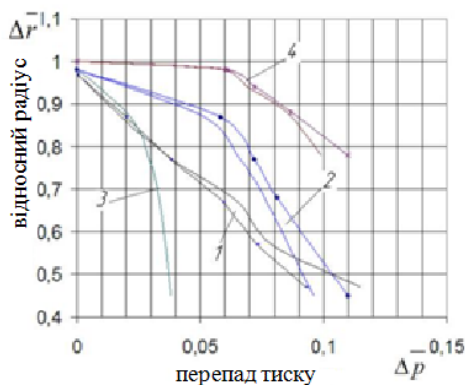


Рисунок А.4 – Залежність перепаду тисків від відносного радіуса колеса для двох коліс із різними  $\beta_{л2} = 32^\circ$  і  $55^\circ$ :

1 – диск у кожусі; 2 – р. к  $\beta_{л2} = 55^\circ$ , робочий диск,  
 3 – р. к.  $\beta_{л2} = 32^\circ$ , робочий диск, 4 – р. к.  $\beta_{л2} = 32^\circ$ ,  
 покривний диск (точками указані експериментальні дані)

Отримані на моделі залежності, наведені на рисунку А.4, дуже добре ілюструють збіжність розрахункових даних з експериментальними для обох типів робочих коліс. Тобто верифікація моделі свідчить про її достатню коректність.

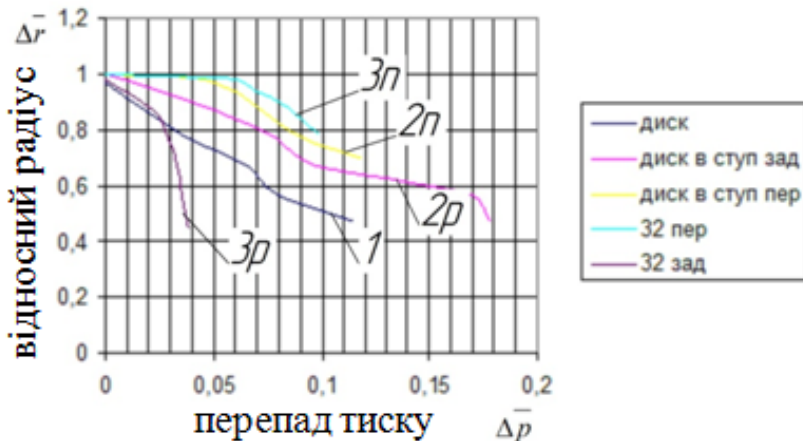


Рисунок А.5 – Порівняння розрахункових результатів для різних схем:

1 – диск у кожусі; 2 – диск у ступені; робоче колесо  $\beta_{л2} = 32^\circ$  у ступені;  $p$  – робочий диск;  $n$  – покривний диск

Розроблена математична модель виявилася коректною для всіх розглянутих розрахункових схем і може бути застосована для чисельного дослідження не тільки розглянутих схем, але і з достатньою ймовірністю може бути рекомендована і для інших турбомашин з обертовими в газовому середовищі робочими колесами.

Досліди на диску проводилися за різних величин бічних зазорів  $S$  за примусового подання чи відсмоктування

повітря в прикореневий зазор, що відповідало течії від центра або до центра. У дослідах на ступені також змінювалися бічні зазори з боку покривного диска  $S_i$  і робочого диска  $S_\partial$ , а протікання в зазорах створювалися під дією тиску нагнітання за колесом. Досліди проводилися на повітрі при атмосферному тиску на всмоктуванні.

## ДОДАТОК Б

### Пружньогідродинамічний аналіз течії в каналі з границями, що деформуються

Вважаємо, що в деякому каналі простої форми за-  
вширшки  $l$  відбувається течія рідини зі швидкістю  $w$   
(рис. Б.1). Унаслідок зростання тиску канал деформується  
на величину  $\Delta l$ . Стоїть питання: потрібно чи ні враховува-  
ти вплив цієї деформації на течію в каналі? Як було зазна-  
чено в главі 7, для такої гідродинамічної системи потрібно  
визначити функцію  $\Phi(Re, \bar{\Delta}) = 0$ .

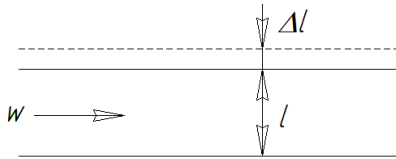


Рисунок Б.1 – Розрахункова схема течії в каналі  
в разі деформації стінки

Проілюструємо визначення  $\Phi$  на основі фізичного  
підходу. Наведену вище функціональну залежність можна  
витлумачити так: деформації потрібно врахувати лише ті-  
єю мірою, якою вони впливають на гідродинаміку потоку.  
Тому варто з'ясувати питання: якою має бути мінімальна  
величина деформації, починаючи з якої гідродинаміка по-  
току змінюється істотно для поставленого завдання? Якщо  
б вдалося отримати універсальний вираз для такої дефор-  
мації, то він був би, якщо не критерієм, то мірою ПГД-  
стану системи.

Звернемося до ВКМ, спрощено подавши її системою проточних елементів (канали проточної частини, зазори між робочим колесом і корпусом, щілинні зазори в ущільненнях тощо). Численні дослідження свідчать, що залежності для коефіцієнтів втрат  $\lambda$  у цих елементах мають вигляд

$$\lambda = CRe^{-m},$$

де  $C$  – деякі постійні;  $m = 1 \dots 1/7$  (значення залежить від режиму течії).

Розглянемо два ідентичних ( $C = idem$ ) канали, у яких під дією перепаду тиску тече нестислива рідина, причому швидкості течії однакові. Будемо вважати деформацію каналу істотною, якщо втрати в ньому змінюються не менше ніж на задану величину  $a$  щодо недеформованого каналу, тобто виконується умова

$$\frac{|\lambda - \lambda'|}{\lambda} \geq a.$$

Числа  $Re$  для жорсткого і пружного каналів дорівнюють відповідно

$$Re = \frac{wl}{\nu}; Re' = \frac{w(l \pm \Delta l)}{\nu} = Re(1 \pm \bar{\Delta}); \bar{l} = \frac{\Delta l}{l},$$

де  $w$  – швидкість течії рідини;  $l$  – поперечний розмір каналу;  $\Delta l$  – величина деформації каналу (знак плюс відповідає розширенню каналу, а знак мінус – звуженню);  $\nu$  – в'язкість рідини.

Підставивши призначення  $Re$  у відповідну формулу, а потім отримані значення  $\lambda$  у формулу, наведену вище, маємо відповідь на поставлене запитання в аналітичному вигляді

$$\left| 1 - \frac{1}{(1 \pm \bar{\Delta})^m} \right| \geq a.$$



Зважаючи на наближеність оцінки  $\bar{\Delta}$ , у розкладанні в ряд виразу нехтуємо величинами другого порядку малості. Отримаємо умову

$$\left| \bar{\Delta} \geq \frac{a}{m} \right|,$$

графічна інтерпретація якого подана на рисунку Б.1. Якщо точка, що відповідає стану з координатами  $a$ ,  $\bar{\Delta}$ , розташована вище кривої заданого режиму течії, то вплив пружних деформацій на гідродинаміку необхідно враховувати.

Діаграма, наведена на рисунку, може бути також корисною в разі призначення допусків на розміри каналів. У цьому разі під величиною  $\bar{\Delta}$  йдеться про максимальний допуск на номінальний розмір каналу, а під  $a$  – про пристрій гідравлічних втрат відповідно до цього допуску. Діаграму можна використовувати і для оцінювання допустимих величин ерозії (корозії) або облітерації проточних каналів. Водночас потрібно виходити з допустимої за умов експлуатації величини зміни гідравлічних втрат.

Оцінимо величину  $a$  для різних випадків. Похибка сучасних експериментальних і теоретичних методів визначення втрат в елементах проточної частини ВКМ становить близько 1 %, і її можна взяти як параметр  $a = 0,01$ . Течія характеризується розвиненим турбулентним режимом ( $Re = 10^6 - 10^7$ ;  $m = 1/5$ ). Похибка гідравлічних розрахунків щілинних елементів – не нижче ніж 5 % ( $a = 0,05$ ), режим течії – зазвичай ламінарний ( $Re = 10^3 - 10^5$ ;  $m = 1$ ). Підставивши ці значення, отримаємо граничне значення відносної деформації  $a \geq 0,05$ , яке може служити умовою перевірки проточного елемента на необхідність проведення ПГД-аналізу. Для щілинних зазорів ущільнень ця відносна деформація повинна становити величину порядку декількох

мікрон, а для каналів проточної частини – кількох десятих часток міліметра.

Спрощена схематизація елементів ВКМ ВТ і наближене обчислення критерію дозволяє на стадії проектування в тому разі, коли це можливо, усунути вплив пружних деформацій за допомогою вибору відповідних характеристик жорсткості елементів. В іншому разі необхідний ПГД-аналіз, який передбачає вибір розрахункової схеми елемента, формулювання завдання та її аналітичний опис у вигляді повної системи рівнянь із подальшим розв'язанням цієї системи чисельним методом.

Водночас, як впливає з рисунка 8.1, виникає досить багато приватних завдань, основні з яких такі: вплив пружних деформацій елементів ротора і статора на ефективність проточної частини і осьову силу, газодинамічних сил на прогин і динаміку ротора, деформацій плавальних кілець масляних ущільнень на їхню герметичність і надійність. Після розв'язання приватних завдань необхідна комплексна перевірка конструкції ВКМ, наприклад аналіз динаміки ротора з урахуванням обчислених газо- і гідродинамічних сил взаємодії його з елементами статора, на основі якого робиться висновок про працездатність конструкції ВКМ ВТ.

Потрібно зазначити, що в деяких випадках для ВКМ ВТ не є можливим, у принципі, забезпечити таку жорсткість конструкції, щоб можна було знехтувати деформаціями елементів. Необхідне ухвалення концепції гнучкої конструкції ВКМ, що полягає в проектуванні за умови не статичного стану, а стану конструкції під робочим навантаженням, що можна здійснити на основі використання методу ПГД-аналізу.

## ДОДАТОК В

Ідентифікація лабіринтних ущільнень

### Моделювання лабіринтного ущільнення з використанням теорії планування експерименту

Під плануванням експерименту йдеться про вибір числа й умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для розв'язання поставленого завдання з необхідною точністю. Планування експерименту дозволяє варіювати низку чинників, одержуючи одночасно кількісні оцінки всіх ефектів, що проявляються, у вигляді формальної моделі об'єкта.

Для дослідження лабіринтового ущільнення був складений план факторного експерименту (ПФЕ). Необхідна кількість дослідів (тобто кількість сполучень значень чинників) буде дорівнювати  $N = 2^n$ , де 2 – кількість рівнів чинника, а  $n$  – кількість чинників. Записавши основні з них:

$s$  – радіальний зазор в ущільненні;

$u = \frac{\pi Dn}{60}$  – колова швидкість валу ущільнення;

$\Delta p = p_{вх} - p_{вих}$  – перепад тиску на ущільненні.

Метою цього дослідження було одержати експериментальні залежності витрати повітря через ущільнення від основних чинників: величини радіального зазору, обертання валу й перепаду тиску, що ущільнює.

Цільову функцію будемо визначати у вигляді полінома першого ступеня

$$m_i = A_0 + A_1s + A_2u + A_3\Delta p, \quad (B.1)$$

де коефіцієнти  $A_0, A_1, A_2, A_3$  підлягають визначенню за результатами експериментального дослідження.

На підставі можливостей експериментального стенда, задаємо верхній і нижній рівні зміни чинників

$$x_1 \rightarrow s = 0,225; 0,37 \text{ мм};$$

$$x_2 \rightarrow u = 0; 84 \text{ м/с};$$

$$x_3 \rightarrow \Delta p = 5717; 12\,896 \text{ Па}.$$

Знаючи максимальне  $x_i^{\max}$  й мінімальне значення чинника  $x_i^{\min}$ , визначимо основний рівень  $x_i^0$  й інтервал варіювання  $\Delta x_i$ ,

$$x_i^0 = \frac{x_i^{\max} + x_i^{\min}}{2}, \quad (\text{B.2})$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;

$$\Delta x_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2}.$$

Матриця планування повного факторного експерименту з урахуванням впливу перехресних чинників подана в таблиці В.1.

Таблиця В.1 – Розширена матриця планування повного факторного експерименту  $2^3$

№ досліджу	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$m_s$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,01
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,0198
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,01
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,0196
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,0139
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,0269
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,0152
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,0273

Рівняння регресії (В.3) набуває вигляду полінома першого ступеня

$$m_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (\text{В.3})$$

Коефіцієнти рівняння регресії визначаються за методом найменших квадратів. Будь-який коефіцієнт рівняння регресії  $b_j$  визначається скалярним добутком стовпця  $y$  на відповідний стовпець  $x_j$ , віднесений до числа дослідів у матриці планування  $N$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i. \quad (\text{В.4})$$

Ефекти взаємодії чинників визначаються аналогічно лінійним ефектам

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_2)_i y_i}{N}, \quad b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_3)_i y_i}{N},$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_2x_3)_i y_i}{N}, \quad b_{123} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1x_2x_3)_i y_i}{N}. \quad (\text{В.5})$$

Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії внесені додаткові досліді для визначення дисперсії відтворюваності

$$s_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{NN} (y_u^0 - \bar{y}^0)^2}{NN - 1}, \quad (\text{В.6})$$

де  $NN$  – кількість паралельних дослідів;

$y_u^0$  – значення, отримані під час постановки кожного з додаткових дослідів у центрі плану.

Значущість кожного коефіцієнта перевірялася за критерієм Стьюдента

$$t = \frac{|b|}{s}, \quad (\text{В.7})$$

де  $s_{bj} = \frac{s_{\text{воспр}}}{\sqrt{N}}$  – точність коефіцієнтів рівнянь.

За результатами проведення експерименту отримане рівняння регресії для трьох чинників, що має вигляд (В.8)

$$m_p = -0,00436 + 0,05 \cdot x_1 - 0,0000189 \cdot x_2 - 0,000000148 \cdot x_3 + 0,0000293 \cdot x_1 \cdot x_2 + 307 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + 396 \cdot 10^{-9} \times x_2 \cdot x_3 - 801 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Результати розрахунків занесені в таблицю В.2.

Таблиця В.2 – Результати розрахунків планування експерименту

№ дослідю	$m_p$	$m_\varepsilon$	$\mu_p$	$\mu_\varepsilon$	Абсолютна погрішність	Відносна погрішність, %
1	0,01	0,01	1,098	1,106	0,0080	0,72
2	0,0198	0,0198	1,31	1,311	0,0010	0,08
3	0,0109	0,01	0,997	0,923	0,0074	8,02
4	0,0210	0,0196	1,129	1,053	0,0076	7,22
5	0,0139	0,0139	1,051	1,05	0,0010	0,10
6	0,0269	0,0269	1,275	1,276	0,0010	0,08
7	0,0171	0,0152	1,206	1,07	0,1360	12,71
8	0,0305	0,0273	1,058	1,194	0,1360	11,39

Адекватність отриманого рівняння регресії перевірялася з використанням критерію Фішера

$$F = \frac{s_{\text{ост}}^2}{s_{\text{воспр}}^2}, \quad (\text{В.9})$$

де залишкова дисперсія розраховується за формулою

$$s_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{r_i})^2}{N - L}, \quad (\text{В.10})$$

де  $L$  – число значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Для опису експерименту використовують систему «чорний ящик» – об’єкт дослідження, що має  $n$  входів і вихід  $v$  (див. рис. В.1). Як приклад на рисунку В.2, а подана поверхня функції відгуку.

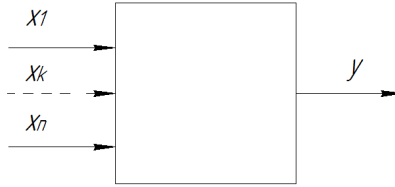
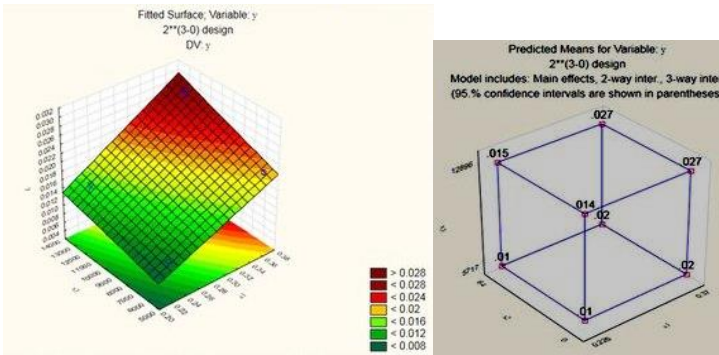
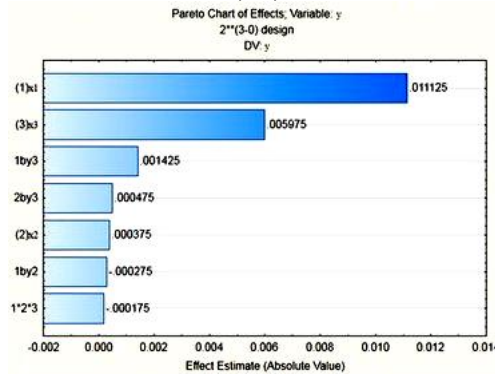


Рисунок В.1 – Об’єкт «чорний ящик»



а) б)



в)

Рисунок В.2 – Поверхня відгуку при  $u = 42$  м/с (а), границі знайденого діапазону зміни витрати через ущільнення (б), графік впливу значущості коефіцієнтів (в)

Залежність між вихідними параметрами (відгуками) і вхідними параметрами (чинниками) називається функцією відгуку  $y = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Цьому рівнянню в багатовимірному просторі відповідає гіперповерхня, яку називають поверхнею відгуку, а сам простір – факторним простором.

Розташування експериментальних точок у факторному просторі для повного факторного експерименту при  $n = 3$  подано на рисунку В.2, б. Точки плану  $2^3$  задаються координатами вершин куба.

З рисунка В.2, в, бачимо, що другий чинник (обертання вала) не впливає на величину протікання через ущільнення, що пояснюється великим впливом інших чинників у заданому діапазоні.

### **Узагальнена модель умовного коефіцієнта витрати лабіринтового ущільнення**

Зміст цього підрозділу стосується математичних моделей гідравлічних опорів у проточній частині лабіринтового ущільнення, що являють собою систему наближених, але фізично обґрунтованих алгебраїчних рівнянь. Неможливість аналітичного визначення втрат вказує на необхідність використання експериментальних даних за допомогою статистичного відбору у вигляді багатопараметричної залежності. Для створення математичної моделі течії в лабіринтовому ущільненні спочатку розклали умовний коефіцієнт витрати на складові

$$\mu = \frac{m}{m_T} = \frac{1}{\sqrt{\xi}}, \quad \text{де}$$

$$\xi = \sum (\xi_{mp} + \xi_{mc})_i.$$



Втрати тиску в ущільненні записуємо у вигляді

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 - \Delta p_3 + \Delta p_4, \quad (\text{B.11})$$

де  $\Delta p_i = \rho_{cp} \frac{v^2}{2g} \zeta_i$ .

Для створення достовірної математичної моделі був якісно описаний робочий процес у лабіринтовому ущільненні системою рівнянь у загальному вигляді з невідомими коефіцієнтами при аргументах.

Коефіцієнти втрат висловлюємо через місцеві опори на підставі фізичних уявлень, тому що втрати тиску складаються із суми гідравлічних втрат із різними коефіцієнтами

$$\xi_1 = a_{11} \left( \frac{k_{ш}}{R_r} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{l'}{2R_r} \right)^{a_{12}} \quad (\text{за А. Д. Альтшулем}),$$

де  $l'$  – збільшення довжини пробігу струменя внаслідок обертання вала;

$R_r = 2s$  – гідравлічний радіус.

$$\xi_2 = 1 - 0,6 + a_{21} M \cdot a_{22} \left( \frac{s}{h} \right)$$

(за дослідями Г. А. Домбровського),

де  $M = c/a$ ,  $a$  – швидкість звуку за нормальних умов;

$$\xi_3 = 1 - a_{31} \cdot \left( \frac{1}{t+1} \right)^2 \frac{p_2^*}{p_1^*} \quad (\text{за Г. М. Абрамовичем});$$

$$\xi_4 = 1 - a_{41} \cdot \frac{s}{\Delta} \quad (\text{за дослідями Б. М. Трояновського}),$$

де  $\xi_1$  – коефіцієнт тертя;

$\xi_2$  – коефіцієнт стиснення струменя;

$\xi_3$  – облік неповноти гасіння швидкості;

$\xi_4$  – облік негостроти входної кромки.

Математична модель сумарного коефіцієнта гідравлічного опору запишеться у вигляді (В.12)

$$\xi = a_{11} \left( \frac{k_{uu}}{R_r} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{l'}{2R_r} \right)^{a_{12}} + 1 - 0,6 + a_{21} M \cdot a_{22} \left( \frac{s}{h} \right) - 1 - a_{31} \cdot \left( \frac{1}{t+1} \right)^2 \frac{p_2^*}{p_1^*} + 1 - a_{41} \cdot \frac{s}{\Delta},$$

а вираз для визначення умовного коефіцієнта витрати ущільнення набуває вигляду

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4}}. \quad (\text{В.13})$$

### Побудова та ідентифікація математичної моделі умовного коефіцієнта витрати

Вихідні дані для ідентифікації бралися за результатами оброблення деяких експериментальних даних (табл. В.3).

Таблиця В.3 – Деякі результати експериментального дослідження

№ пор.	s, мм	n, об./хв	$p_1 / p_2$	$\ell$ , мм	$\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	$U_{abc}$ , м/с	Re	m, кг/с	$\mu$	$\frac{p_2^*}{p_1^*}$	M
1	0,225	0	1,06	24	1,265	46,9	7379	0,01	1,106	0,947	0,14
2	0,37	0	1,06	24	1,225	56,6	14645	0,0198	1,311	0,946	0,17
3	0,225	6693	1,06	27,4	1,263	96,2	15131	0,01	0,923	0,93	0,29
4	0,37	6693	1,06	28,6	1,255	101	26133	0,0196	1,053	0,936	0,31
5	0,225	0	1,12	24	1,3	63	9920	0,0139	1,05	0,9	0,19
6	0,37	0	1,12	24	1,263	76,4	18719	0,0269	1,276	0,89	0,23
7	0,225	6693	1,12	30,8	1,3	109	17150	0,0152	1,07	0,868	0,33
8	0,7	6693	1,12	32,2	1,263	114	27960	0,0273	1,194	0,877	0,35

Згідно з теорією ідентифікації для кожного експерименту записуємо рівняння (В.13) з використанням експериментальних даних (табл. В.3), прирівнюючи відповідні експериментальні значення коефіцієнта  $\mu$ . Так отримуємо систему рівнянь із шістьма невідомими коефіцієнтами.

Система розв'язується матричним методом, вибираємо розв'язок, який задовольняє умову мінімуму неув'язки

$$\min(\mu_{\text{експ}} - \mu_{\text{розн}})^2. \quad (\text{В.14})$$

Після знайдення невідомих коефіцієнтів  $a_i$  математична модель набуває вигляду (В.15)

$$\xi_i = 0,806 \left( \frac{k}{R_r} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{l'}{d_r} \right)^{4,104} + \left( 1 - 0,6 + 2,242 \cdot 10^{-8} M \cdot (-1)8,0881 \cdot 10^{-8} \left( \frac{s}{h} \right) \right) + (-1) \cdot \left( 1 - 0,068 \cdot \left( \frac{1}{t+1} \right)^2 \cdot \frac{p_2^*}{p_1^*} \right) + \left( 1 - 2,973 \cdot \frac{s}{\Delta} \right).$$

Результати ідентифікації занесені в таблицю В.4, з якої бачимо, що середня абсолютна похибка між отриманими значеннями не перевищує 6 %, що свідчить про коректність розробленої математичної моделі.

Таблиця В.4 – Порівняння експериментальних значень  $\mu$  з розрахованими

№ дослідів	n, об./хв	s, мм	$\mu_{\text{експ.}}$	$\mu_{\text{ідент.}}$	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
1	0	0,225	1,106	1,028	0,078	7,05
2	0	0,37	1,311	1,215	0,096	7,32
3	6693	0,225	0,923	1,027	0,104	11,27
4	6693	0,37	1,053	1,215	0,162	15,38
5	0	0,225	1,05	1,027	0,023	2,19
6	0	0,37	1,276	1,213	0,063	4,94
7	6693	0,225	1,07	1,026	0,044	4,11
8	6693	0,37	1,194	1,213	0,019	1,59

Запропоновано математичну модель умовного коефіцієнта витрати ущільнення, засновану на уявленні гідравлічного опору лабіринтового ущільнення як суми місцевих опорів, описуваних аналітичними виразами. Розв'язане завдання ідентифікації моделі з використанням дослідних даних. Отримана модель може бути застосована в діапазоні геометричних і режимних параметрів, у дослідях.

Навчальне видання

**Бондаренко Герман Андрійович,  
Бага Вадим Миколайович**

# **ОСНОВИ СУЧАСНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН**

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки Г. А. Бондаренка  
Редактор І. О. Кругляк  
Комп'ютерне верстання: О. В. Казбан, Т. С. Родимченко

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 5,81. Обл.-вид. арк. 6,24. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.