

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

А. В. КОЗЛОВСЬКИЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**для проведення занять з дисципліни
«Комп'ютеризовані системи проєктування
газотурбінних установок»**

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2025

УДК 621.438(076)

K59

Автор:

А. В. Козловський – канд. техн. наук, доцент

Рецензент:

В. М. Патлайчук – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри турбін Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Рекомендовано Методичною радою НУК

Козловський А. В.

K59 Методичні вказівки для проведення занять з дисципліни «Комп'ютеризовані системи проектування газотурбінних установок» / А. В. Козловський. – Миколаїв : НУК, 2025. – 46 с.

Наведено відомості щодо організації проведення занять з дисципліни «Комп'ютеризовані системи проектування газотурбінних установок», які розроблені відповідно до вимог Болонського процесу; роз'яснено види і форми контролю знань студентів; розглянуто зміст структурних елементів навчальних модулів. До кожної навчальної теми додаються плани лекційних занять, перелік питань для самостійної роботи та самоконтролю засвоєння матеріалу, рекомендовані основна та допоміжна література.

Призначено для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G11 «Машинобудування» спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки» освітньої програми «Газотурбінні установки і компресорні станції» денної та заочної форм навчання.

УДК 621.438(076)

© А. В. Козловський, 2025

© Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2025

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Комп'ютеризовані системи проєктування газотурбінних установок» є однією із складових комплексної підготовки фахівців другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G11 «Машинобудування» спеціалізації G11.02 «Двигуни та енергетичні установки» освітньої програми «Газотурбінні установки і компресорні станції» денної та заочної форм навчання, освітня діяльність за якою реалізується у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Дисципліна спрямована на засвоєнні базових знань і вивчення теоретичних основ комп'ютеризованих систем проєктування турбінних агрегатів, а також отримання практичних навичок в розробці сучасних конструкцій турбінних установок різного призначення.

Дисципліна повинна надати студентам глибинні професійні знання щодо теоретичних засад, які лежать в основі сучасних та перспективних комп'ютеризованих системах проєктування турбоагрегатів, програмного забезпечення комп'ютеризованих систем проєктування, інформаційної підтримки життєвого циклу газотурбінних агрегатів різного призначення.

Внаслідок вивчення дисципліни студент ознайомиться з основами проєктування та виробництва перспективних схем та конструкцій газотурбінних агрегатів із використанням сучасних інформаційних технологій, з послідовністю розробки та проєктування деталей ГТА та дослідженням гідродинамічних та газодинамічних параметрів спроектованих вузлів на базі систем інженерного аналізу.

Методичні вказівки підготовлені відповідно до робочої програми цієї дисципліни, яка була розглянута і затверджена Навчально-методичною радою НУК ім. адм. Макарова (протокол № 2 від 20.03.2025 року) [4].

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність (освітня програма), освітній рівень	Характеристика навчальної дисципліни			
		Денна форма навчання		Заочна форма навчання	
Кількість кредитів – 10	Спеціальність: G11 «Машинобудування» Спеціалізація: G11.02 «Двигуни та енергетичні установки» Освітня програма: «Газотурбінні установки і компресорні станції»	Обов’язкова			
Модулів – 3		Рік підготовки:			
Змістових модулів – 4		1-й		1-й	
Індивідуальне науково-дослідне завдання: курсова робота					
Загальна кількість годин – 300		Семестри:			
		1-й	2-й	1-й	2-й
		Лекції			
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 та 4; самостійної роботи студента – 5 та 8.	Освітній рівень: другий (магістерський)	15 год.	15 год.	6 год.	8 год.
		Лабораторні заняття			
		30 год.	45 год.	14 год.	22 год.
		Самостійна робота			
		75 год.	120 год.	100 год.	150 год.
		Індивідуальні завдання			
		–	КР	–	КР
		Вид контролю: залік (1-й семестр), залік та курсова робота (2-й семестр)			
		Форма контролю: комбінована			

2. МЕТА ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою вивчення навчальної дисципліни «Комп'ютеризовані системи проєктування газотурбінних установок» є формування у студентів відповідно до освітньо-професійної програми таких **компетентностей**:

- ІК-1. Здатність розв'язувати задачі дослідницького та/або інноваційного характеру у галузі енергетичного машинобудування.

- СК 01. Здатність застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки в сфері енергетичного машинобудування.

- СК 06. Здатність проєктувати та експлуатувати енергетичне і теплотехнологічне обладнання.

- СК 09. Здатність розробляти фізичні та математичні моделі процесів в газотурбінних установках, а також в системах та механізмах, які їх обслуговують, з аналізом результатів і розробкою методик розрахунку.

- СК 10. Здатність розробляти методики розрахунків і проведення досліджень при проєктуванні газотурбінних установок та компресорного обладнання з використанням сучасних інформаційних технологій.

3. ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Передумовою для вивчення другого модуля дисципліни є освоєння матеріалу дисципліни «Теорія робочих процесів газотурбінних установок», який викладається у 1-му навчальному семестрі.

4. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у студентів таких **програмних результатів навчання**:

- РН3. Формулювати і розв'язувати складні інженерні, виробничі та/або дослідницькі задачі під час проєктування, виготовлення і експлуатації енергетичного обладнання та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у інноваційних проєктах.

- РН6. Використовувати методи моделювання, а також методи експериментальних досліджень з метою детального вивчення тепло- і масообмінних, гідравлічних та інших процесів, які відбуваються в технологічному обладнанні та об'єктах енергетичного машинобудування.

- РН8. Розробляти, обирати та застосовувати ефективні розрахункові методи розв'язання складних задач енергетичного машинобудування.

- РН14. Використовувати сучасні інформаційні системи та технології при проєктуванні газотурбінних установок та компресорного обладнання.

5. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

5.1. Теми лекційних занять

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	денна форма					заочна форма				
	усього	у тому числі				усього	у тому числі			
		л	пр.	лаб.	с.р.		л	пр.	лаб.	с.р.
Модуль 1 (перший семестр)										
Змістовий модуль 1. Метод кінцевих елементів у системах CAE.										
Тема 1. Огляд систем CAE. Можливості моделювання для процесів в газотурбінних двигунах. Поняття майстер-моделі та майстер-процесу.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 2. Модулі та можливості програмного комплексу Ansys.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 3. Метод кінцевих елементів. Основні поняття. Поняття кінцевого елемента. Алгоритми та методи побудови кінцево-елементних розрахункових сіток засобами програмного комплексу Ansys.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 4. Побудова програми МКЕ. Облік нелінійності в процедурах МКЕ.	15	2	–	4	9	15	–	–	1	14
Методи оптимізації в інженерному аналізі.										

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	денна форма					заочна форма				
	усього	у тому числі				усього	у тому числі			
		л	пр.	лаб.	с.р.		л	пр.	лаб.	с.р.
Разом за змістовим модулем 1	60	8	–	16	36	60	3	–	7	50
Змістовий модуль 2. Методи проектування ГТД та його частин за допомогою методу кінцевих елементів.										
Тема 5. Перспективи розвитку конструкцій та методів проектування ГТД.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 6. Методика розрахунку лопаток на міцність у тривимірній постановці.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 7. Методологія числового моделювання аеродинамічних течій в турбінах та компресорах.	15	2	–	4	9	15	1	–	2	12
Тема 8. Методологія розрахунків теплового стану основних елементів турбін за допомогою числових методів.	15	1	–	2	12	15	–	–	1	14
Разом за змістовим модулем 2	60	7	–	14	39	60	3	–	7	50
Усього годин за модулем 1	120	15	–	30	75	120	6	–	14	100
Модуль 2 (другий семестр)										
Змістовий модуль 3. Теорія та приклади застосування МКЕ для вирішення задач міцності та теплопровідності										
Тема 9. Рівняння жорсткості кінцевого елемента.	12	2	–	6	4	12	1	–	3	8
Тема 10. Рівняння МКЕ. Граничні та початкові умови.	11	2	–	6	3	11	1	–	3	7
Тема 11. Вирішення рівнянь МКЕ. Аналіз результатів рішення.	11	2	–	6	3	11	1	–	3	7

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	денна форма					заочна форма				
	усього	у тому числі				усього	у тому числі			
		л	пр.	лаб.	с.р.		л	пр.	лаб.	с.р.
Тема 12. Застосування методу МКЕ для розрахунку фермової конструкції.	11	2	–	6	3	11	1	–	2	8
Разом за змістовим модулем 3	45	8	–	24	13	45	4	–	11	30
Змістовий модуль 4. Теорія застосування МКЕ для вирішення задач гідрогазодинаміки										
Тема 13. Рівняння руху рідини. Рівняння Нав'є–Стокса.	12	2	–	6	4	12	1	–	3	8
Тема 14. Огляд моделей турбулентностей для течій рідини.	11	2	–	6	3	11	1	–	3	7
Тема 15. Граничні умови для задач числової гідрогазодинаміки.	11	2	–	6	3	11	1	–	3	7
Тема 16. Моделювання потоків у лопаточних машинах з системою координат, що обертається.	11	1	–	3	7	11	1	–	2	8
Разом за змістовим модулем 4	45	7	–	21	17	45	4	–	11	30
Усього годин за модулем 2	90	15	–	45	30	90	8	–	22	60
Модуль 3 (курсова робота)										
Інформаційний пошук	6	–	–	–	6	6	–	–	–	6
Опис програмного комплексу Ansys Workbench Academic його структури, можливостей та галузей застосування.	8	–	–	–	8	8	–	–	–	8

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	денна форма					заочна форма				
	усього	у тому числі				усього	у тому числі			
		л	пр.	лаб.	с.р.		л	пр.	лаб.	с.р.
Побудова тривимірної моделі лопатки або іншої деталі ГТД, згідно свого креслення, використовуючи інструментарій CAD програм.	12	–	–	–	12	12	–	–	–	12
Модальний аналіз деталі ГТД.	16	–	–	–	16	16	–	–	–	16
Виконання гідродинамічного аналізу, визначивши осьову та радіальну силу, що діють на лопатку.	10	–	–	–	10	10	–	–	–	10
Виконання статичного аналізу міцності лопатки, враховуючи навантаження від відцентрових сил та гідродинамічних сил діючих на перо лопатки.	9	–	–	–	9	9	–	–	–	9
Виконання теплового аналізу лопатки, визначивши поле температур лопатки.	10	–	–	–	10	10	–	–	–	10
Опис процедури проведених розрахунків та аналіз результатів.	7	–	–	–	7	7	–	–	–	7
Оформлення розрахунково-пояснювальної записки.	6	–	–	–	6	6	–	–	–	6
Захист роботи.	6	–	–	–	6	6	–	–	–	6
Усього годин за модулем 3	90	–	–	–	90	90	–	–	–	90
Разом за курсом	300	30	–	75	195	300	14	–	36	250

6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

6.1. Змістовий модуль 1. Метод кінцевих елементів у системах САЕ

Тема 1. Огляд систем САЕ. Можливості моделювання для процесів у газотурбінних двигунах. Поняття майстер-моделі та майстер-процесу

Турбінобудування належить до однієї з найбільш наукомістких галузей енергетичного і транспортного машинобудування. Зростаючі вимоги до ефективності та надійності турбомашин, а також розширення діапазону параметрів і умов експлуатації створюють передумови для їхнього безперервного конструктивного і технологічного вдосконалення.

ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» за більш ніж 30-річний період експлуатації САПР ГТД на підприємстві набула великого розвитку: від автоматизації розрахунків на базі ЕОМ до автоматизації проєктування і конструювання з використанням графічної системи AutoCAD, систем високого рівня Unigraphics та середнього – SolidWorks на базі сучасних персональних комп'ютерів.

Компанія **General Electric** завжди прагнула використовувати передові технології однією з перших. Не оминала увагою і програмні комплекси CAD/CAM/CAE, які активно використовували під час проєктування та виготовлення такого високотехнологічного виробу як газотурбінний двигун. У певний період часу купувались ліцензії САПР різних компаній, однак, останнім часом компанія зупинилася на програмних продуктах Siemens NX компанії Siemens PLM Software для проєктування газових турбін і підтримки їх виробництва на

всіх етапах життєвого циклу виробу. Крім того, слід відзначити багаторічну плідну співпрацю з компанією ANSYS, програмні продукти якої дають змогу проводити різні типи аналізу для деталей ГТД, тим самим допомагаючи співробітникам компанії в ухваленні рішень щодо поліпшення конструкції двигуна.

Компанія **Pratt & Whitney** звернула свою увагу на PLM-системи, які покривали б неперервні процеси розвитку інноваційних розробок. Для підтримки життєвого циклу двигунів Pratt & Whitney зупинила свій вибір на PLM-рішенні Dassault Systemes та IBM, що базується на Catia v5, Enovia VPM, Enovia Portal та Delmia.

Тема 2. Модулі та можливості програмного комплексу Ansys

ANSYS – універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу. Система кінцево-елементного аналізу, що існує та розвивається протягом останніх 40 років, є досить популярною у фахівців у галузі комп'ютерного інжинірингу (CAE, Computer-Aided Engineering). Система працює на основі геометричного ядра Parasolid.

Програма містить у собі низку модулів, одні з основних:

ANSYS Workbench – загальне середовище для інтегрування всіх модулів ANSYS;

ANSYS Mechanical – дає змогу проводити практично будь-які статичні та динамічні розрахунки, як у лінійній, так і в нелінійній (фізичній/геометричній) постановці, а також визначати поля температур із розв'язання задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності, конвекції, теплообміну випромінюванням;

ANSYS Structural – дає змогу проводити практично будь-які статичні та динамічні розрахунки, як у лінійній, так і в нелінійній (фізичній/геометричній) постановці;

ANSYS Professional – дає змогу виконувати лінійні міцнісні, динамічні та теплові розрахунки, розв'язувати

контактні задачі, проводити геометрично нелінійні розрахунки та оптимізацію;

ANSYS CFD – включає в себе **ANSYS CFX** і **ANSYS FLUENT**, які призначені для розрахунків у галузі обчислювальної гідро- і газодинаміки.

Тема 3. Метод кінцевих елементів. Основні поняття. Поняття кінцевого елемента. Алгоритми та методи побудови кінцево-елементних розрахункових сіток засобами програмного комплексу Ansys

Метод кінцевих елементів (МКЕ) в даний час є стандартом при вирішенні задач механіки твердого тіла за допомогою числових алгоритмів. Популярний свого часу метод кінцевих різниць, а також претендував на універсальність метод граничних елементів (граничних інтегральних рівнянь) зараз займають досить вузькі ніші, обмежені дослідними або спеціальними завданнями. МКЕ зайняв лідируюче положення завдяки можливості моделювати широке коло об'єктів і явищ. Абсолютна більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, виготовлених з найрізноманітніших матеріалів, що мають різну природу, можуть бути розраховані за допомогою МКЕ.

В основі методу лежить дискретизація об'єкту з метою вирішення рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються в межах кожної з елементарних областей. Ці області називаються **кінцевими елементами**. Вони можуть відповідати реальній частині простору, як, наприклад, просторові елементи, або ж бути математичною абстракцією, як елементи стрижнів, балок, пластин або оболонок. В межах кінцевого елемента призначаються властивості ділянки об'єкту, що їх обмежує (це можуть бути, наприклад, характеристики жорсткості та міцності матеріалу, густина, тощо).

Тема 4. Побудова програми МКЕ. Облік нелінійності в процедурах МКЕ. Методи оптимізації в інженерному аналізі

Маючи математичний апарат для отримання матриць жорсткості кінцевих елементів, наведених навантажень, прикладених до поверхні або в об'ємі елементу до зусиль у вузлах, а також розв'язку обернених задач: обчислення полів деформацій і напруг в об'ємі елементу на базі переміщень у вузлах, можна побудувати **алгоритм МКЕ**. Наведено один з його варіантів для вирішення завдань в **лінійній постановці**.

Нелінійні задачі характеризуються нелінійною залежністю між діючими факторами та реакцією на них системи. Крім того, нерідко граничні умови (прикладені навантаження та переміщення) змінюються в часі. Для обліку цього явища вводиться поняття крива часу. Сенс її в тому, що вводиться параметр, який має розмірність часу та, в залежності від його величини, визначаються їм умови.

Модифікація алгоритму МКЕ стосовно вирішення нелінійних задач – управління збереженням системою стану рівноваги. У більшості прикладних програм присутні три методи, які використовуються для різних класів задач:

- **метод сил** – після збільшення навантажень відповідно до кривої часу на величину деякого кроку визначаються переміщення, що задовольняють рівнянням рівноваги;
- **метод переміщень** – для призначеного збільшення переміщень. Підбирається параметр часу, що визначає діючі в цей момент силові фактори;
- **метод довжини дуги** – відомий як метод продовження по найкращому параметру. Програма автоматично вводить деякий параметр, званий параметром продовження, який входить в додаткове рівняння, що включається в рівняння рівноваги;
- **метод Ньютона–Рафсона** – коли дотична матриця жорсткості будується на кожній ітерації в межах будь-якого кроку збільшення навантаження. Сам по собі алгоритм має квадратичну швидкість збіжності і має високу стійкість;

- **модифікований метод Ньютона–Рафсона** – дотична матриця жорсткості на кожному кроці збільшення навантаження будується один раз, а потім використовується на всіх субітераціях у межах кроку. Цей алгоритм вимагає більшого числа ітерацій, однак час економиться за рахунок скорочення операцій з матрицею жорсткості.

6.2. Змістовий модуль 2. Методи проєктування ГТД та його частин за допомогою методу кінцевих елементів

Тема 5. Перспективи розвитку конструкцій та методів проєктування ГТ.

Основні напрямки розвитку конструкцій турбін пов'язані з прогресом у низці найбільш перспективних (за співвідношенням вартості та ефективності) технологій, які мають забезпечити розроблення конкурентоспроможних турбін у майбутньому:

- **2D-аеродинаміка: ефективні охолоджувані лопатки ТВТ.** Скорочення кількості ступенів турбіни – це найбільш радикальний шлях скорочення собівартості виробництва та обслуговування. Одноступеневі ТВТ повинні мати ефективні для високих чисел Маха охолоджувані лопатки. Вони повинні дозволити приблизно вдвічі зменшити відмінність в аеродинамічній ефективності одноступінчастої та двоступеневої ТВТ.

- **2D-аеродинаміка: скорочення кількості лопаток.** Технології скорочення кількості лопаток – збільшення аеродинамічного навантаження на профіль без зменшення його ефективності (або з «прийнятним» зменшенням) у даний час найбільш популярні та активно розвиваються. У всіх нових проєктах заявляється про скорочення кількості лопаток, як головного засобу зниження вартості турбіни і вартості її обслуговування.

- **Протилежне обертання роторів ТВТ і ТНТ.** Протилежне обертання роторів ТВТ і ТНТ (СТ) дає змогу знизити кут повороту потоку та втрати енергії в першій сопловій лопатці ТНТ.

- **2D-аеродинаміка: ефективні решітки профілів ТНТ:** решітки ТНТ із підвищеною частотою обертання (редукторним приводом); оптимізація взаємодії лопаткових решіток ТВТ і ТНТ; профілі лопаток ТНТ, ефективні при малих числах Рейнольдса; оптимізація взаємного кутового розташування лопаткових решіток.

- **3D-аеродинаміка лопаткових вінців** (1CA та 2CA ТВТ, соплових апаратів ТНТ) активно використовується під час розробки турбін. Ускладнені форми лопаткових вінців залишаються досить ефективним напрямком збільшення ККД турбіни.

- **Нові матеріали та покриття для лопаток і дисків** є одним із найбільш дієвих засобів підвищення ефективності та надійності турбіни. Вони дають змогу безпосередньо збільшувати здатність турбіни працювати при більш високій температурі – зі збереженням ККД і витраті охолоджувального повітря.

- **Удосконалення конструкцій охолоджуваних лопаток.** лопатки з монокристалічних сплавів, з теплозахисним покриттям – забезпечують в умовах максимальних робочих температур перед ротором ТВТ до 1800...1900 К розрахунковий ресурс експлуатації до 15000 годин або до 3000 циклів.

- **Оптимізовані системи управління радіальними зазорами.** При зростанні міри підвищення тиску в двигунах і зменшення довжини лопаток у турбінних ступенях зростає вплив радіальних зазорів. Наявні системи керування радіальними зазорами безперервно ускладнюються – переважно за рахунок введення багатопозиційного управління витратою охолоджувального повітря у систему зовнішнього охолодження корпусів, управління джерелами відбору – за рахунок перемикання між різними ступенями компресора, урахування

зовнішніх умов і режиму роботи двигуна, введення систем зворотного зв'язку.

- **Розвиток засобів і методів проєктування:** удосконалення 3D-моделювання потоку в турбіні; підвищення ефективності методів аеродинамічного проєктування лопаток; моделювання нестационарного потоку.

Тема 6. Методика розрахунку лопаток на міцність у тривимірній постановці

Розрахунок на міцність лопаток за тривимірними моделями дозволяє з будь-якою необхідною мірою деталізації врахувати особливості форми лопатки, діючих на неї сил, поля температур. При необхідності враховується поява пластичних деформацій, ефекти повзучості, контактна взаємодія лопатки із сусідніми деталями.

Для проведення міцнісних розрахунків на базі тривимірних моделей у теперішній час використовується метод кінцевих елементів. Основні етапи розрахунку з використанням цього методу:

- перший етап – створення геометричної моделі. Просторова 3D-модель будується в процесі проєктування лопатки на основі газодинамічних розрахунків і попередньої оцінки міцності за стержневою моделлю;
- другий етап – створення кінцево-елементної моделі, яка являє собою сукупність кінцевих елементів, що замінює геометричну модель кінцевих елементів;
- третій етап – завдання граничних умов і температурних полів. Для лопаток граничними умовами є розподіл по поверхні пера газодинамічні сили та обмеження на переміщення в замку та на полицях;
- четвертий етап – завдання моделі поведінки та характеристик матеріалу;
- п'ятий етап – проведення кінцево-елементного розрахунку.

Тема 7. Методологія числового моделювання аеродинамічних течій у турбінах та компресорах

Числове моделювання має забезпечити надійне визначення і контроль розподілу ступеня розширення потоку за ступенями і вінцями, розподілу швидкостей потоку в проточній частині лопаткових вінців. Числове моделювання аеродинаміки здійснюється за допомогою розв'язання систем рівнянь, що описують стисливий дозвуковий і трансзвуковий потік у кожній із елементів сітки, на яку розбивається вся область проточної частини. Рівняння Ейлера використовуються для опису ідеального (нев'язкого), а рівняння Нав'є–Стокса – в'язкого потоку.

Як показує практика, найбільш важливі для проектування характеристики реального потоку (розподіл статичного тиску в осевих зазорах проточної частини, розподіл швидкості по обводах профілів, розподіл кута виходу потоку з вінців) з достатнім ступенем точності можуть розраховуватися в припущенні стаціонарності та «нев'язкості» потоку, тобто з використанням рівнянь Ейлера. У рішення з використанням рівнянь Ейлера можуть бути введені втрати енергії для моделювання «ефектів» в'язкості, тобто наближення до характеристик реального потоку.

Моделювання з використанням рівнянь Нав'є–Стокса дає змогу отримати такі важливі кількісні характеристики потоку, як рівень втрат енергії в плоскій решітці або просторовому вінці, а також ідентифікувати відривні явища в проточній частині.

Вирішення рівнянь Ейлера незрівнянно менш трудомістке за витратами часу (для найпростішого випадку плоскої решітки простого випадку плоскої решітки – приблизно на порядок) та набагато надійніше (розрахунок більш стійкий).

Тема 8. Методологія розрахунків теплового стану основних елементів турбін за допомогою числових методів

Коректне визначення температурного стану деталей турбіни належить до числа найбільш важливих завдань на етапі проєктування. Температурний стан деталі турбіни визначається переважно конвективним теплообміном із зовнішнім середовищем і контактним теплообміном із сполученими деталями. Променистим теплообміном у практичних розрахунках можна знехтувати внаслідок його незначності, крім визначення температури соплової лопатки першого ступеня, де його частка може бути досить значною.

Основним способом визначення теплового стану деталей турбіни в даний час є розрахунок за методом кінцевих елементів (МКЕ) у двовимірній (поперечний переріз лопатки або вісесиметричний переріз ротора) та просторовій постановці.

При розрахунках роторів і корпусів турбіни, що складаються здебільшого з тіл обертання, використовуються вісесиметричні (2D) розрахункові моделі, які дають змогу з деякими допущеннями отримати уявлення про тепловий стан вузла в цілому.

Соплові та робочі лопатки турбіни є найбільш теплонапруженими деталями двигуна і тому практично визначають як міжремонтний, так і загальний ресурс двигуна.

Найбільш інформативним методом визначення теплового стану охолоджуваної лопатки є тепловий розрахунок у тривимірній постановці. Зважаючи на його складність і трудомісткість, а також певних методичних проблем у достовірному визначенні граничних умов на стадії проєктувальних розрахунків в основному використовуються двовимірні розрахунки температурних полів у перерізах лопаток.

Моделювання течії в багатоступеневій турбомашині на основі рівнянь Ейлера для нев'язкого стаціонарного потоку є найбільш важливим завданням, що реалізується в нев'язкій постановці. Модель 3D-Ейлера може бути реалізована

«з урахуванням ефектів в'язкості», тобто завданням час моделювання течії втрат енергії в кожному вінці. Визначення цих втрат може бути здійснено окремо з використанням 2D/3D-моделей Нав'є–Стокса або ці втрати можуть генеруватися в самій моделі відповідно до методу, запропонованого Дентоном.

Моделювання течії газу в проточній частині багатоступеневої охолоджуваної турбіни проводяться в рамках 3D-системи рівнянь Ейлера з додатковими членами для опису ефектів в'язких втрат, «видування» охолоджувального повітря, витоків, перетікань через радіальні зазори тощо.

Під час переходу від вінця до вінця використовується спеціальна процедура усереднення параметрів по окружному напрямку, що дає змогу розглядати стаціонарні рішення, обмежувати область розрахунку для кожного вінця одним міжлопатковим каналом і значно скоротити час, необхідний для виконання розрахунків.

6.3. Змістовий модуль 3. Теорія та приклади застосування МКЕ для вирішення задач міцності та теплопровідності

Тема 9. Рівняння жорсткості кінцевого елемента

Розглянемо спочатку лінійно-пружну задачу деформування твердого тіла за малих деформацій і малих переміщень. Приймають, що кінцеві елементи взаємодіють тільки через спільні вузли. Внутрішні розподілені сили, що діють по границях елемента, замінюються статично еквівалентними вузловими силами, що складають вектор вузлових сил елемента. Зовнішні розподілені масові та поверхневі сили, що діють на скінченний елемент, приводяться до статично або енергетично еквівалентних вузлових сил. До еквівалентних вузлових сил приводяться також сили інерції (як масові сили), початкові деформації, зокрема температурні деформації, початкові напруження.

Обґрунтування рівняння матричного рівняння жорсткості може бути виконано за допомогою теорії пружності або опору матеріалів, але такий підхід має низку недоліків. Ефективнішими і в багатьох випадках коректнішими способами обґрунтування рівнянь жорсткості елементів є варіаційні методи та методи нев'язок.

Варіаційні методи дають змогу одержувати загальну систему рівнянь рівноваги всієї моделі без уведення вузлових сил, тобто без припущення про взаємодію елементів тільки через вузли і без складання співвідношень для жорсткості елементів.

Якщо завдання деформування динамічне, то, на підставі принципу Даламбера, до рівнянь додаються вузлові сили, еквівалентні масовим силам інерції, що залежать від прискорення. Демпфірування враховується еквівалентними об'ємними силами в'язкого опору, пропорційними швидкості.

У разі нестаціонарної теплопровідності необхідно додати доданок, що враховує накопичення тепла в матеріалі.

Тема 10. Рівняння МКЕ. Граничні та початкові умови

З умов рівноваги вузлів або за допомогою варіаційних принципів, а також методів нев'язок, що застосовуються до всієї кінцево-елементної моделі, складають загальну систему рівнянь рівноваги всієї кінцево-елементної моделі досліджуваного деформованого тіла.

У динамічних завданнях на підставі принципу Даламбера в рівняння кінцево-елементної моделі досліджуваного деформованого тіла додаються сили інерції. Оскільки сили інерції виражаються через прискорення, які є другими похідними від переміщень, то рівняння рівноваги перетворюються на загальні (глобальні) диференціальні рівняння руху.

Роздільні диференціальні рівняння нестаціонарної задачі теплопровідності для всієї моделі виходять аналогічно.

В рівняннях балансу теплових потоків усі теплові навантаження можуть бути нестаціонарними. Компоненти всіх

загальних матриць визначаються шляхом підсумовування відповідних компонентів з однаковими індексами всіх елементних матриць.

Силові граничні умови враховуються глобальними векторами вузлових сил. Граничні умови в переміщеннях можуть враховуватися як під час формування матриць елементів, так і після складання загальних матриць моделі.

Завдання переміщень реалізується через завдання вузлових переміщень. Це рівнозначно зниженню числа ступенів свободи моделі та може враховуватися шляхом видалення із загальної системи рівнянь рівноваги рівнянь, що відповідають пов'язаним ступеням свободи. У результаті змінюється розмірність матриць розв'язної системи рівнянь. Для статичних задач частіше застосовується інший підхід, за якого розмірність матриць не змінюється.

У статичних задачах задані переміщення повинні виключати можливість переміщення навантаженої конструкції як абсолютно твердого тіла. Тільки в цьому разі розв'язувальна система рівнянь, після врахування граничних умов, матиме єдиний розв'язок. До врахування зв'язків вихідна система має лінійно залежні рівняння, визначник її матриці жорсткості дорівнює нулю, отже, матриця жорсткості вільного тіла є сингулярною (особливою), і не можна знайти однозначного розв'язку для вузлових переміщень. Ця математична особливість відображає фізичний факт, що врівноважені сили, які діють на вільне тіло, у статичних задачах не визначають однозначно переміщення через невизначеність зміщення його як твердого тіла. Динамічні задачі можуть розв'язуватися без накладення зв'язків – переміщень.

У задачах теплопровідності граничні умови першого роду – задані вузлові температури (зв'язки) враховуються так само, як задані переміщення в деформаційній задачі. Граничні умови другого роду – задані теплові потоки і граничні умови третього роду – конвективні потоки враховуються в рівняннях балансу теплових потоків.

Для нестационарних задач мають бути визначені початкові умови. У динамічних задачах деформування потрібно знати для деякого початкового моменту часу початкові положення і початкові швидкості всіх точок тіла. У нестационарній задачі теплопровідності потрібно знати для деякого початкового моменту часу початкове поле температур.

Тема 11. Вирішення рівнянь МКЕ. Аналіз результатів рішення

Загальна система рівнянь рівноваги, отримана методом кінцевих елементів для статичної лінійно-пружної моделі тіла, є, з математичної точки зору, системою лінійних алгебраїчних рівнянь. Після врахування правильно накладених зв'язків, що не допускають руху моделі як абсолютно твердого тіла, визначник матриці жорсткості не дорівнює нулю і, отже, існує єдиний розв'язок. Загальна система лінійних рівнянь стаціонарної теплопровідності також є системою лінійних алгебраїчних рівнянь, що має, після врахування зв'язків, єдиний розв'язок. Розв'язок цієї системи дає вектор вузлових температур.

Точність і ефективність різних способів розв'язування системи лінійних рівнянь багато в чому залежить від структури та властивостей матриці: розміру, обумовленості, симетричності, наповненості тощо. Відомі алгоритми розв'язування системи лінійних рівнянь можна розділити в основному на дві групи: прямі методи та ітераційні методи.

Прямі («точні») методи дають змогу одержувати за допомогою деякої кількості операцій точні значення невідомих, якщо коефіцієнти та праві частини рівнянь задано точно і немає округлень під час обчислень. Серед безлічі прямих методів найбільше застосування мають: метод виключення невідомих Гаусса, метод квадратного кореня, а також їхні різновиди, зокрема, фронтальний метод і схема розкладання Холецкого.

Ітераційні методи характеризуються тим, що спочатку задаються деякими наближеними значеннями невідомих. Потім за допомогою будь-яких алгоритмів їх послідовно уточнюють, наближаючись до точного рішення. Найчастіше використовують метод прямої ітерації, метод Гауса–Зейделя, метод послідовної верхньої релаксації, градієнтні методи якнайшвидшого спуску та спряжених градієнтів.

Для кінцевих елементів першого порядку з лінійною інтерполяцією переміщень величини деформацій і напружень усередині елементів виходять постійними, отже, на межах між елементами ці величини матимуть розриви. Для квадратичних елементів і елементів більш високого порядку з нелінійною інтерполяцією переміщень величини деформацій і напружень усередині елементів змінюються і обчислюються зазвичай наближено. На межах елементів за такого підходу поля деформацій і напружень мають кінцеві розриви. З метою уточнення результатів обчислень застосовують різні способи усереднення. Наприклад, у вибраному вузлі беруть середню величину вузлових значень напружень, знайдених для всіх елементів, що примикають до цього вузла. Більш точні результати отримують за допомогою теорії спряженої апроксимації.

Тема 12. Застосування методу МКЕ для розрахунку фермової конструкції

Фермою називається незмінна конструкція з прямих стрижнів, з'єднаних між собою шарнірами. Сили прикладаються до шарнірів – вузлів ферми, закріплення здійснюються також у вузлах. Статичний розрахунок ферми полягає у визначенні переміщень вузлів, реакцій опор, зусиль у стрижнях, напружень і деформацій стрижнів.

Розглянемо ферму, що має n вузлів і m стрижнів, у якій осі стрижнів і сили лежать в одній площині. Переміщення також обмежимо цією площиною; така ферма називається плоскою, або двовимірною.

Ферму відразу можна аналізувати як кінцево-елементну модель. Стрижні є одновимірними скінченними елементами, а шарнірні з'єднання – вузлами. Як ступені свободи візьмемо вузлові переміщення, які вважатимемо малими.

6.4. Змістовий модуль 4. Теорія застосування МКЕ для вирішення задач гідрогазодинаміки

Тема 13. Рівняння руху рідини. Рівняння Нав'є–Стокса

Для деяких задач розрахунку течії в'язкої рідини не можна отримати точне рішення за допомогою спрощених рівнянь. До прикладів таких завдань належать взаємодія ударної хвилі з прикордонним шаром, обтікання вхідний кромки, деякі хвилювості течії в сліді та інші течії з сильною в'язко-нев'язкою взаємодією та великими відривними зонами. У цих випадках необхідно вирішувати повні рівняння Нав'є–Стокса (чи середні по Рейнольдсу рівняння Нав'є–Стокса). На жаль, ці рівняння дуже складні, і їх вирішення вимагає великих витрат машинного часу. Якщо, однак, рідина нестислива, то рівняння суттєво спрощуються і відповідно зменшується час, необхідний їх вирішення.

Нестаціонарні рівняння Нав'є–Стокса для стиснення рідини утворюють змішану систему гіперболічно-параболічних рівнянь, а для нестисливої рідини – еліптично-параболічних рівнянь. Тому доводиться використовувати різні числові методи розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса у цих двох випадках.

Нестаціонарні рівняння Нав'є–Стокса для стисливої рідини утворюють змішану систему гіперболічно-параболічних рівнянь відносно часу. Якщо в цих рівняннях опустити нестаціонарні члени, то отримана змішана система буде гіперболічно-еліптичного типу, розв'язувати яку важко через несхожість методів числового розв'язання рівнянь гіперболічного та еліптичного типів. Тому чи не всі успішні випадки розв'язання

рівнянь Нав'є–Стокса для стисливої рідини пов'язані з нестаціонарною формою цих рівнянь. Стаціонарний розв'язок отримують встановленням за часом.

Для розв'язання залежних від часу рівнянь Нав'є–Стокса для стисливої рідини використовувалися як явні, так і неявні схеми. Майже всі ці схеми мають другий порядок точності за простором і або перший, або другий за часом. Якщо потрібно отримати точну картину розвитку течії в часі, то порядок схеми за часом має бути принаймні другим. Якщо ж цікавить тільки сталий розв'язок, то часто вигідно користуватися не тільки точними за часом схемами, оскільки встановлення можна отримати за меншу кількість кроків за часом.

Зважаючи на велику додаткову складність, є мало повідомлень про застосування схем третього порядку (і вище) в розрахунках рівнянь Нав'є–Стокса для стисливої рідини. Багато хто розуміє, що вибір схем другого порядку є оптимальним, оскільки більша точність вимагає істотно більших витрат машинного часу.

Тема 14. Огляд моделей турбулентності для течій рідини

Істотний вплив на прогнози властивості розроблюваної математичної моделі надає вибір гідродинамічної моделі турбулентності. В даний час відомо досить велика кількість різних їх модифікацій, проте обґрунтованого рішення стосовно до систем гомогенно-дифузійного горіння ще немає. Тому питання про ефективне використання та вибір моделей турбулентного перенесення є актуальним.

Стандартна k - ϵ модель турбулентності. Модель являє собою сукупність диференціальних рівнянь переносу кінетичної енергії турбулентності k і питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ϵ .

RNG різновид k - ϵ моделі турбулентності. Рівняння RNG k - ϵ моделі турбулентності виходять з нестаціонарних рівнянь Нав'є–Стокса з використанням математичного методу

реномгрупи. У них присутнє додаткове рівняння для обчислення турбулентної в'язкості, а значення констант відрізняються від тих, що використовуються в стандартній k - ϵ моделі.

Основні підходи до нестационарного числового моделювання турбулентності:

1. Пряме числове моделювання (directnumerical, DNS). У рамках цього підходу кількісно вирішуються системи алгебраїчних рівнянь, з високою точністю апроксимуючі вихідну систему диференціальних рівнянь Нав'є–Стокса. DNS – найточніший метод, який вимагає детального просторово-часового вирішення і веде до великих обчислювальних витрат. Тому DNS рідко застосовується на практиці.

2. Рішення систем рівнянь, осереднених по Рейнольдсу (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS). У даному випадку модель відтворює тільки середні значення швидкості, а вплив всіх флуктуацій враховується за допомогою турбулентних замикань. Під осередненням в RANS розуміється осереднення за ансамблем станів. RANS можуть бути не тільки тривимірними, а й двовимірними та одновимірними. Якщо турбулентність відбувається на тлі швидкого або повільного процесу, то можлива побудова нестационарної моделі RANS(unsteady RANS – URANS).

3. Вихоророзв'язуюче моделювання або моделювання методом великих вихорів (large eddy simulation, LES). Основою вихоророзв'язуючого моделювання турбулентних потоків з дуже великими числами Рейнольдса ($Re \gg 1$) є гіпотеза про незалежність статистичних характеристик великомасштабних турбулентних рухів від молекулярної в'язкості. Згідно з цим припущенням, можлива побудова числової моделі, яка описує нестационарну динаміку тільки відносно великих вихорів, при цьому обчислювальні витрати необхідні для реалізації такої моделі не повинні залежати від числа Рейнольдса, оскільки немає необхідності явно і точно розраховувати всі дрібні вихори.

Тема 15. Граничні умови для задач числової гідродинаміки

Для числового рішення системи диференціальних рівнянь, що описують процеси в проточних частинах ГТД, необхідно ставити додаткові умови на границях розрахункової області, які є фізичними параметрами. Для завдань, що розглядаються при моделюванні процесів в проточній частині газотурбінних двигунів, найчастіше використовувалися такі типи граничних умов:

«Вхід газу» – границя, через яку суміш газів втікає в розрахункову область. На границі входу задаються: масова витрата суміші, напрям вектора швидкості, температура, масові частки хімічних компонентів, надлишковий тиск, рівні кінетичної енергії і дисипації турбулентності.

«Вихід» – границя, через яку суміш газів витікає з розрахункової області. На виході задається статичний тиск, крім того, при наявності тут зворотних струмів, задається ряд незалежних змінних: вектор швидкості, температура, масові частки хімічних компонентів, величини кінетичної енергії та дисипації турбулентності.

«Стінка». Стінки вважаються адіабатичними, нерухомими і гідродинамічно гладкими. Крім того, при течії в'язкого газу на непроникній стінці має бути задана природна умова «прилипання», яка припускає, що швидкість потоку на стінці дорівнює нулю. Однак, безпосереднє застосування умови «прилипання» вимагає модифікації моделі турбулентності в пристінковій області, де турбулентна в'язкість близька до молекулярної, і значного подрібнення розрахункової сітки поблизу стінки. Складність геометрії проточних частин ГТД зазвичай не дозволяє створювати розрахункові сітки необхідної розмірності через обмеженість обчислювальних ресурсів. Тому замість умови «прилипання» для опису турбулентного прикордонного шару в цій математичній моделі передбачається використовувати напівемпіричні функції, що зв'язують

значення незалежних змінних в центрі пристінкової розрахункової кінцевого елемента зі значеннями відповідних змінних на стінці, і базуються на припущенні Лаундер і Сполдінга.

***Тема 16.** Моделювання потоків у лопаточних машинах з системою координат, що обертається*

В даний час для розрахунку в'язкої течії газу в міжлопатковому каналі використовують CFD-розв'язувачі рівнянь газової динаміки. У них реалізовано найефективніші обчислювальні алгоритми для розв'язання систем рівнянь у вигляді методів кінцевих різниць і кінцевих об'ємів. Розробка методу CFD за останні роки дала змогу проводити розрахунки та моделювання робочих процесів за короткий час і з високою точністю. Моделювання за допомогою CFD-розв'язувачів забезпечує розрахунок параметрів газодинамічного потоку, оскільки експериментальні випробування компресорів дуже дорогі та у багатьох випадках неможливі.

Числове моделювання потоку газу для розв'язання практичних інженерних задач найчастіше проводять у стаціонарній постановці. Однак такий підхід не дає змоги врахувати деякі важливі моменти, як-от: статор-ротор взаємодія, вторинні течії, взаємодія крайових слідів, які суттєво впливають на достовірність отриманих результатів моделювання.

Наразі проводиться багато досліджень у сфері моделювання газодинамічного потоку під час обертання аеродинамічної решітки профілів. При цьому часто використовувалася двовимірна модель потоку. Потоки зазвичай описували рівняннями Ейлера, які розв'язували або за допомогою центральнорізницевого схем другого порядку апроксимації зі штучною в'язкістю, або за допомогою схем зворотного потоку.

7. ТЕМИ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна форма	заочна форма
1	Графічний інтерфейс Ansys Workbench. Робота з проєктом в Ansys Workbench	4	2
2	Графічний інтерфейс модуля Design Modeler	4	2
3	Управління матеріалами та їх властивостями	4	2
4	Генерація кінцево-елементної сітки в Ansys Workbench	4	2
5	Побудова кінцево-елементної тетраедричної моделі з призматичним шаром теплообмінника	4	2
6	Побудова кінцево-елементної моделі з тетраедричних елементів камери згоряння	4	2
7	Побудова кінцево-елементної моделі лопатки та лопаточного каналу з тетраедричних елементів	4	1
8	Завдання граничних умов та експорт кінцево-елементних сіток	2	1
	Усього годин за модулем 1	30	14
9	Статичний конструкційний аналіз. Послідовність вирішення статичної задачі (частина 1)	2	1
10	Статичний конструкційний аналіз. Послідовність вирішення статичної задачі (частина 2)	2	1
11	Стаціонарний тепловий аналіз	4	2
12	Лінійний конструкційний аналіз	4	2
13	Модальний аналіз кришки мотора або лопатки	4	2

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна форма	заочна форма
14	Статичний конструкційний аналіз лопатки навантаженої відцентровою силою	4	2
15	Статичний конструкційний аналіз лопатки навантаженої відцентровою та гідродинамічними силами	4	2
16	Модальний аналіз навантаженої лопатки	4	2
17	Тепловий аналіз лопатки з диском	4	2
18	Тепловий нестационарний аналіз охолоджуваної лопатки	4	1
19	Генерація розрахункової моделі ступені лопаточної машини за допомогою Ansys CFX	2	1
20	Аналіз результатів отриманих при розрахунку ступеня за допомогою Ansys CFX	2	1
21	Вплив обраної моделі турбулентності на результати числового експерименту	2	1
22	Оптимізація геометрії ступені на базі результатів отриманих за допомогою числового моделювання	2	1
23	Гідродинамічний аналіз циклонного сепаратора	1	1
	Усього годин за модулем 2	45	22
	Разом за курсом	75	36

8. САМОСТІЙНА РОБОТА

Відповідно до «Положення про робочу програму навчальної дисципліни у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова» [3], розподіл годин самостійної роботи для студентів денної та заочної форм навчання становить:

- підготовка до практичних занять – 2 години на кожне заняття;
- підготовка рефератів – мінімум 10...15 годин на кожну роботу;
- підготовка до контрольного заходу (екзамену) – 15 годин.

№ з/п	Вид роботи	Кількість годин	
		денна форма	заочна форма
1	Підготовка до практичних занять	14	12
2	Підготовка рефератів	16	41
3	Підготовка до екзамену	15	15
	РАЗОМ:	45	68

9. МЕТОДИ НАВЧАННЯ, ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ ТА МЕТОДИ ЇХ ДЕМОНСТРУВАННЯ

Набуття здобувачами компетенцій забезпечується через засвоєння навчального матеріалу у вигляді лекційних, практичних занять та самостійної роботи студентів.

Основними методами навчання з дисципліни є:

1. Пояснювально-ілюстративний метод, за допомогою повідомлення та засвоєння інформації на лекційних та практичних заняттях словесними та наочними засобами.
2. Проблемний метод, коли на практичних заняттях утворюються пошукові ситуації, розвивається активність, самостійність, творчі здібності здобувачів освіти.

Як наочний матеріал на лекціях застосовуються мультимедійні слайди та лекційні демонстрації.

З метою роз'яснення найбільш складних питань дисципліни та підвищення якості виконання завдань практичних робіт проводяться групові та індивідуальні консультації за розкладом кафедри.

Під час карантину та військових дій заняття проводяться дистанційно в режимі відеоконференцій за допомогою онлайн-платформи Google Meet.

Засобами оцінювання та методами демонстрування результатів навчання з дисципліни «Суднові турбіни та турбокомпресори» є:

- усні та письмові відповіді на практичних заняттях;
- підготовка рефератів;
- екзамен.

10. ФОРМИ ПОТОЧНОГО ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ

Досягнення студента оцінюються за 100-бальною шкалою, яка використовується у НУК ім. адм. Макарова [2].

Підсумкова оцінка навчального курсу включає в себе оцінки з поточного контролю і оцінки заключного екзамену. У кожного компонента своя частка в загальній системі оцінок.

В проміжних оцінках студент може набрати максимум **60 балів**. Під компонентом проміжних оцінок розуміються поточні оцінки протягом семестру (усні та письмові відповіді на практичних заняттях, підготовка рефератів).

Питома вага заключного екзамену в загальній системі оцінок – **40 балів**. Право здавати заключний екзамен надається студенту, якій з урахуванням отриманих балів проміжних оцінок і заключного екзамену може набрати разом не менше **60 балів**. Підсумкова оцінка навчального курсу є сумою проміжних оцінок і оцінки екзамену.

Екзамен відбувається в усній формі шляхом відповіді на 4 питання екзаменаційного білету. За відповідь на кожне питання студент може отримати максимум **10 балів**.

Зарахування кредитів навчального курсу можливе тільки після досягнення результатів, запланованих робочою програмою дисципліни, що виражається в одній з позитивних оцінок, передбачених «Положенням про порядок оцінювання знань студентів у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова» [2].

Форма контролю	Максимальна кількість балів	
	Денна форма	Заочна форма
Відповіді на практичних заняттях	7 x 4 бали = 28 балів	6 x 3 бали = 18 балів
Підготовка рефератів	2 x 16 балів = 32 бали	3 x 14 балів = 42 бали
Екзамен	4 x 10 балів = 40 балів	4 x 10 балів = 40 балів
РАЗОМ:	100	100

Відповіді на практичних заняттях (денна форма)	Критерії оцінювання
4 бали	Відповідь правильна, повна, логічна, містить аналіз, систематизацію, узагальнення, використані міжпредметні зв'язки, містить аргументовані висновки.
3 бали	Відповідь в цілому правильна, достатньо повна, логічна; допущені несуттєві помилки та неточності у викладенні матеріалу.
2 бали	Відповідь частково правильна, містить неточності, недостатньо обґрунтована.
1 бал	Відповідь має суттєві помилки, аргументи несформульовані, використовується невірна термінологія.
0 балів	Студент не дає відповіді або відповідь містить значну кількість суттєвих помилок.
<i>Максимальна кількість балів за даною формою контролю становить 28 (7 занять по 4 бали)</i>	

Відповіді на практичних заняттях (заочна форма)	Критерії оцінювання
3 бали	Відповідь правильна, повна, логічна, містить аналіз, систематизацію, узагальнення, використані міжпредметні зв'язки, містить аргументовані висновки.
2 бали	Відповідь в цілому правильна, достатньо повна, логічна; допущені несуттєві помилки та неточності у викладенні матеріалу.

Відповіді на практичних заняттях (заочна форма)	Критерії оцінювання
1 бал	Відповідь частково правильна, містить неточності, недостатньо обґрунтована.
0 балів	Студент не дає відповіді або відповідь містить значну кількість суттєвих помилок.
<i>Максимальна кількість балів за даною формою контролю становить 18 (6 занять по 3 бали)</i>	

Підготовка реферату (у дужках для заочної форми)	Критерії оцінювання
13–16 (13–14) балів	Зміст роботи відповідає обраній темі; наявність чітко сформульованої проблеми; адекватність формулювання об'єкта, предмета, мети та задач дослідження; наявність посилань на використану літературу та відповідність оформлення роботи стандарту; відповідність висновків меті та завданням дослідження. Робота виконувалась систематично та вчасно подана на перевірку керівнику у відповідності із планом виконання.
10–12 (10–12) балів	Зміст роботи відповідає обраній темі; але має поверхневий аналіз, матеріал викладено непослідовно та необґрунтовано. Робота виконувалась несистематично та подана на перевірку керівнику з порушенням плану виконання.
7–9 (7–9) балів	Студент відтворює значну частину теоретичного матеріалу, виявляє знання і розуміння основних положень і лише за допомогою викладача може виправляти помилки, серед яких є значна кількість суттєвих.
4–6 (4–6) балів	Студент виявляє знання і розуміння більшості положень, але лише за допомогою викладача може виправляти помилки, серед яких є значна кількість суттєвих.

Підготовка реферату (у дужках для заочної форми)	Критерії оцінювання
0–3 (0–3) бали	Робота не носить дослідницького характеру, не має аналізу і не відповідає пред’явленим вимогам. У роботі немає висновків або вони носять декларативний характер.
<i>Максимальна кількість балів за даною формою контролю становить 32 для денної форми навчання (2 реферати по 16 балів) та 42 за заочною формою навчання (3 реферати по 14 балів).</i>	

Відповідь на питання екзамену	Критерії оцінювання
9–10 балів	Відповідь логічно побудована, студент чітко та стисло викладає матеріал, показує глибокі знання з питання білету, під час доповіді впевнено і докладно відповідає на поставлені запитання.
7–8 балів	Студент спроможний чітко та стисло зробити доповідь, дає правильну відповідь на запитання білету, але не завжди упевнений в аргументації або не завжди коректно її формулює.
5–6 балів	Студент спроможний чітко та стисло відповісти на питання білету, належно обґрунтовує матеріал, але допускає суттєві неточності у відповідях на запитання.
3–4 бали	Студент невпорядковано дає відповіді на питання білету, намагається дати відповідь на поставлені запитання і робить спроби аргументувати свою позицію, але надає неповні, поверхові, необґрунтовані відповіді на поставлені питання.
1–2 бали	Студент невпорядковано дає відповідь на питання білету, не спроможний аргументувати свою позицію, не може впевнено та чітко відповісти на додаткові запитання членів комісії.
0 балів	Студент не дає відповіді на питання білету.
<i>Максимальна кількість балів за даною формою контролю становить 40 (4 питання по 10 балів)</i>	

11. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Номер модуля або теми		Денна форма		Заочна форма	
		Вид роботи	Бали	Вид роботи	Бали
ЗМ1	T1	Практичне заняття № 1	4	Практичне заняття № 1	3
	T3	Практичне заняття № 2	4	Практичне заняття № 2	3
	T5	Практичне заняття № 3	4	—	—
	T1-T5	Підготовка реферату № 1	16	Підготовка реферату № 1	14
ЗМ2	T6	Практичне заняття № 4	4	Практичне заняття № 3	3
	T10	Практичне заняття № 5	4	Практичне заняття № 4	3
	T12	Практичне заняття № 6	4	Практичне заняття № 5	3
	T14	Практичне заняття № 7	4	Практичне заняття № 6	3
	T6-T15	Підготовка реферату № 2	16	Підготовка реферату № 2	14
				Підготовка реферату № 3	14
Підсумковий контроль		Екзамен	40	Екзамен	40
Сума			100		100

12. ЗАСОБИ НАВЧАННЯ

У ролі спеціальних засобів навчання використовуються мультимедійна техніка (проєктори, екрани), графічні засоби (малюнки, креслення, схеми, плакати), моделі турбінних агрегатів та їх окремих елементів і систем.

13. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

13.1. Основна література

1. Сербін С.І., Мостипаненко Г.Б. Інформаційні технології у турбінобудуванні : навч. посібник. Миколаїв : Вид-во НУК, 2012. 143 с.
2. Автоматизоване проєктування в машинобудуванні : навчальний посібник / М.О. Свірень, І.М. Осипов, М.М. Петренко та ін. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2017. 320 с.
3. Донченко М.В. Технології комп'ютерного проєктування : навч. посіб. / М.В. Донченко. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 364 с.

13.2. Допоміжна література

1. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник / С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, Ю.В. Клак. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.
2. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем : навч. посібник / В.Я. Ворошук, Т.М. Вітенько. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.
3. Грищенко В.М., Свіргун О.А., Калінін Є.І., Савченко В.Б. Основи ANSYS. Лабораторний практикум : навч. посіб. Харків : ХНТУСГ, 2020. 168 с.
4. ANSYS WORKBENCH: Знайомство. Початок роботи. метод. вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін «Опір матеріалів», «Механіка матеріалів і конструкцій», та блоку вибіркових дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної, заоч. та дистанц. форм навч. інженерних спеціальностей / Державний біотехнологічний університет; уклад.: М.В. Сліпченко, В.Б. Савченко, О.А. Свіргун, В.М. Грищенко, В.І. Іванов. Харків : [б. в.], 2023. 40 с.

14. ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ В МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ

1. Сайт компанії Ansys. – Режим доступу: www.ansys.com.
2. Сайт компанії SolidWorks. – Режим доступу: www.solidworks.com.

Список використаних джерел

1. Положення про порядок оцінювання знань студентів у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова / укладачі: А.В. Лабарткава, В.В. Савочкіна, В.В. Івата. *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова* : офіц. вебсайт. URL: <https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/Polozhennya-pro-poryadok-ocinjuvannya-znan-studentiv-u-NUK-2020.pdf> (дата звернення: 23.01.2023).

2. Положення про робочу програму навчальної дисципліни у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова / укладачі: А.В. Лабарткава, В.В. Савочкіна, В.В. Івата. *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова* : офіц. вебсайт. URL: <https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/Polozhennya-pro-robochu-programu-navchalnoi-discipliniNUK2020.pdf> (дата звернення: 23.01.2023).

3. Робоча програма навчальної дисципліни «Комп'ютеризовані системи проєктування газотурбінних установок». *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова* : офіц. вебсайт. URL: <https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/OK7-RPND-Komp-juterizovani-sistemi-proiektuvannya-gazoturbinnih-ustanovok-2022.pdf> (дата звернення: 23.01.2023).

ЗМІСТ

Передмова.....	3
1. Опис навчальної дисципліни.....	5
2. Мета вивчення навчальної дисципліни.....	6
3. Передумови для вивчення дисципліни.....	7
4. Очікувані результати навчання.....	8
5. Тематичний план навчальної дисципліни.....	9
5.1. Теми лекційних занять.....	9
6. Програма навчальної дисципліни.....	13
6.1. Змістовий модуль 1. Метод кінцевих елементів у системах САЕ.....	13
6.2. Змістовий модуль 2. Методи проєктування ГТД та його частин за допомогою методу кінцевих елементів.....	17
6.3. Змістовий модуль 3. Теорія та приклади застосування МКЕ для вирішення задач міцності та теплопровідності.....	22
6.4. Змістовий модуль 4. Теорія застосування МКЕ для вирішення задач гідрогазодинаміки.....	27
7. Теми лабораторних занять.....	32
8. Самостійна робота.....	34
9. Методи навчання, засоби діагностики результатів навчання та методи їх демонстрування.....	35

10. Форми поточного та підсумкового контролю	36
11. Критерії оцінювання результатів навчання	40
12. Засоби навчання.....	41
13. Рекомендована література.....	42
14. Інформаційні ресурси в мережі інтернет.....	43

Навчальне видання

КОЗЛОВСЬКИЙ Артем Вікторович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**для проведення занять з дисципліни
«Комп'ютеризовані системи проєктування
газотурбінних установок»**

Комп'ютерне верстання *Н. М. Ковальчук*
Коректор *О. Є. Вакула*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,67. Вид. № 34. Зам. № 0903-08.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.