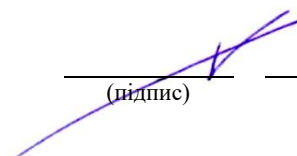


Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми



(підпис) Павло ГАКАЛ
(ім'я та прізвище)

« 30 » 08 2023 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОБОВ'ЯЗКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ

(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань: 14 «Електрична інженерія»
(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»
(код і найменування спеціальності)


Освітня програма: Інжиніринг та експлуатація теплоенергетичних систем
(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
(рівень освіти)

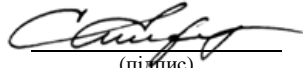
Харків 2023

Розробник Марценюк Євген Вікторович, ст. викл. каф. 203
(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри
Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 28 » серпня 2023.

Завідувач кафедри д.т.н., професор  Сергій ЄПІФАНОВ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показника	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 3	Галузь знань: 14 <u>«Електрична інженерія»</u> (шифр і назва)	Обов'язкова
Кількість модулів – 1	Спеціальність: 144 <u>«Теплоенергетика»</u> (шифр і назва)	Навчальний рік 2023 / 2024
Кількість змістових модулів – 1		Семестр 1-й
Індивідуальне завдання: <i>Немає</i> <hr/> (назва)		Лекції* 16 год.
Загальна кількість годин – 40*/90		Практичні, семінарські* 24 год.
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 2,5 самостійної роботи студента – 3,125	Освітня програма: <i>Інжиніринг та експлуатація теплоенергетичних систем</i> <hr/> (назва)	Лабораторні* –
	Рівень вищої освіти: <u>другий (магістерський)</u>	Самостійна робота 50 год.
		Вид контролю <i>Модульний контроль, іспит</i>

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить 40 / 50

* Аудиторне навантаження може бути зменшене або збільшене на одну годину в залежності від розкладу занять.

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: придбання знань та умінь, необхідних для виконання інженерних розрахунків основних деталей авіаційного газотурбінного двигуна в програмному пакеті ANSYS.

Завдання: вивчення особливостей виконання інженерних розрахунків в програмному комплексі ANSYS.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей:**

Загальні компетентності: ЗК 1. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. ЗК 2. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

Спеціальні (фахові) компетентності: СК 1. Здатність застосовувати та удосконалювати математичні та комп'ютерні моделі, наукові і технічні методи та сучасне комп'ютерне програмне забезпечення для розв'язання складних інженерних задач в теплоенергетиці. СК 3. Здатність застосовувати релевантні математичні методи для розв'язання складних задач в теплоенергетиці. СК 6. Здатність приймати рішення щодо матеріалів, обладнання, процесів в теплоенергетиці з урахуванням їх властивостей та характеристик. СК 9. Здатність моделювати теплові, гідродинамічні процеси в енергетичних системах, у тому числі з використанням сучасних обчислювальних методів. СК 13. Здатність аналізувати тепловий та теплонапружений стан деталей поршневих, газотурбінних двигунів та іншого енергетичного обладнання.

Програмні результати навчання: ПР 2. Аналізувати і обирати ефективні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи розв'язання складних задач теплоенергетики. ПР 5. Розробляти і досліджувати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі об'єктів та процесів теплоенергетики, перевіряти адекватність моделей, порівнювати результати моделювання з іншими даними та оцінювати їх точність і надійність. ПР 8. Обґрунтовувати вибір та застосування матеріалів, обладнання та інструментів, інженерних технологій і процесів з урахуванням їх характеристик і властивостей, вимог до кінцевого продукту, а також нетехнічних аспектів. ПР 11. Оцінювати і забезпечувати якість об'єктів і процесів теплоенергетики. ПР 20. Вирішувати практичні задачі з тепло- масообміну, теплонапруженого стану з використанням сучасних обчислювальних методів та прикладного комп'ютерного забезпечення. ПР 25. Аналізувати умови функціонування теплонапружених деталей, тепловий стан та термоміцність деталей двигунів та енергетичного обладнання в різних умовах функціонування.

Пре-реквізити: Вища математика, Фізика, Теоретична механіка, Термодинаміка і теплообмін.

Ко-реквізити: Моделювання та розрахунок процесів в енергетичних системах.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль 1

ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ

ТЕМА 1. Історія розвитку САЕ систем. Стисла характеристика систем-лідерів: їх основні переваги і недоліки. Місце студійованої САЕ системи та її можливості.

ТЕМА 2. Роль числових методів в розрахунках на міцність. Основні етапи числового дослідження міцності конструкції. Ідея і галузь застосування метода кінцевих елементів (МКЕ). Основні етапи практичної реалізації. Типи кінцевих елементів.

ТЕМА 3. Етапи створення кінцево-елементної сітки. Призначення атрибутів об'єктам твердотільної моделі. Керування щільністю сітки. Методи створення кінцево-елементних сіток.

ТЕМА 4. Аналітичне розв'язання задач розрахунку балок на міцність: методика постановки, розв'язання задач та аналізу результатів в програмному комплексі ANSYS. Лінійні та нелінійні постановки задач.

ТЕМА 5. Випробування матеріалів: діаграма “напруження-деформації”. Типи нелінійності в задачах розрахунків на міцність. Алгоритм нелінійного аналізу, його ладнання.

ТЕМА 6. Типи граничних умов в теплових задачах. Задання граничних умов і умов теплового контакту. Стаціонарні і нестаціонарні задачі теплопровідності. Формування функціональних залежностей теплофізичних характеристик матеріалів від температури.

ТЕМА 7. Особливості розрахунку дисків компресорів і турбін на міцність. Методика виконання розрахунку тепло напруженого стану деталі. Плоска постановка задачі. Особливості задання граничних умов на поверхні диска турбіни.

ТЕМА 8. Власні та вимушені коливання. Методика розрахунку власних форм і частот коливань на прикладі робочих лопаток. Частотна діаграма.

ТЕМА 9. Методика постановки і рішення контактних задач. Загальна характеристика задач динаміки. Параметри динамічних розрахунків. Динамічне застосування навантаження. Спектральний відгук у разі ударного навантаження.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	усього	денна форма			
		у тому числі			
<i>l</i>	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)					
ТЕМА 1. Загальні відомості про САЕ системи	3	1	-	-	2
ТЕМА 2. Основні положення методу кінцевих елементів	3	1	-	-	2
ТЕМА 3. Створення кінцеве-елементної сітки	6	-	2	-	4
ТЕМА 4. Розрахунок балок та рам на міцність	10	2	4	-	4
ТЕМА 5. Особливості рішення нелінійних задач	12	2	2	-	8
ТЕМА 6. Задачі поширення тепла	16	2	4	-	10
ТЕМА 7. Розрахунок дисків компресорів і турбін на міцність	18	4	6	-	8
ТЕМА 8. Частотний аналіз робочих лопаток ГТД	7	1	2	-	4
ТЕМА 9. Контактні задачі. Аналіз динаміки конструкції	14	2	4	-	8
Модульний контроль	1	1	-	-	-
Разом за змістовим модулем 1	90	16	24	-	50
Усього годин	90	16	24	-	50

5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		0
	Разом	0

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)		
1	Створення кінцево-елементної сітки	2
2	Розрахунок балок з використанням бібліотеки сортаменту	2
3	Розрахунок рам з сортаментом користувача	2
4	Розрахунок балок: нелінійний аналіз	2
5	Стаціонарні та нестаціонарні задачі теплопровідності	4
6	Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни ГТД з урахуванням умов його кріплення до валу	2
7	Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни ГТД з урахуванням умов його кріплення до валу	4
8	Частотний аналіз лопатки компресора	2
9	Контактні задачі: моделювання процесу запресовування штифта	4
	Разом	24

7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		0
	Разом	0

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ)		
1	Основні положення метода кінцевих елементів	2
2	Графічний інтерфейс, командний рядок програмного комплексу ANSYS	2
3	Створення кінцево-елементної сітки	4
4	Методика роботи з програмою. Рішення основних інженерних задач (міцності, теплопровідності, стійкості та ін.)	34
5	Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску	8
	Разом	50

9. Індивідуальне завдання

Немає.

10. Методи навчання

Основні форми навчання:

- лекційна;
- практичні роботи;
- самостійна робота студента;
- іспит.

На лекціях студентів даються основні поняття, основи теорії, закономірності, необхідні для підготовки до практичних занять, виконання самостійної роботи.

Лекція, розв'язує тільки одну дидактичну задачу – дає первісне знайомство з темою, організовує первісне сприйняття матеріалу, формулює основні проблеми.

Проведення практичних занять базується на індивідуальному виконанні студентами розрахунків деталей газотурбінних двигунів на міцність, теплових розрахунків та ін. с подальшим аналізом і поясненням отриманих результатів.

Основною формою навчання є самостійна робота. До неї не можна приступати без певного багажу знань, які даються на лекції. Під час самостійної роботи студенти поглиблено вивчають лекційний матеріал, готуються до проведення практичних робіт.

11. Методи контролю

11.1. Тестування

Матеріал дисципліни містить один змістовий модуль: Чисельні методи в інженерних розрахунках.

Складання модулю – на 21-му тижні 1-го семестру (один раз).

До складання модулю студент допускається за умови виконання всіх видів обов'язкових робіт, передбачених у модулі.

Оформлення практичних робіт – *електронний звіт*, захист – *усно*.

Семестр 1 – *іспит*.

11.2. Питання для контролю та самостійної роботи студентів

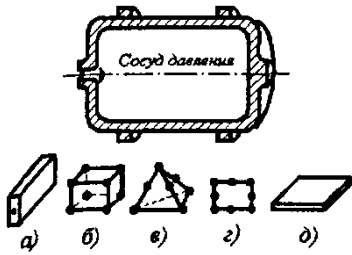
Модуль 1

Змістовий модуль 1

1. Чим зумовлена необхідність появи метода кінцевих елементів?
2. Основні поняття та принципи метода кінцевих елементів.
3. Етапи вирішення задач з допомогою МКЕ.
4. Порівняльний аналіз програм-лідерів за колом задач, границь застосування і т. ін.
5. Перелік задач, що можуть бути вирішені за допомогою програмного комплексу ANSYS: вихідні дані та отримані результати.
6. Структура інтерфейса ANSYS та загальна характеристика меню.
7. Робота з командним файлом.
8. Перелік та властивості геометричних примітивів.
9. Типи кінцевих елементів: призначення точок, балок та оболонки.
10. Особливості елементів, що застосовуються для моделювання вісесиметричних задач.
11. Різниця між елементами першого та другого порядку.
12. Поняття системи координат: різні типи і їх призначення (для побудови складної геометрії, закріплення, навантаження).
13. Особливості побудови сітки: основні характеристики якісно побудованої сітки; «вільна» і впорядкована сітка.
14. Процес побудови сітки: контрольований користувачем, та автоматичний. Переваги та недоліки різних підходів.
15. Який вплив має орієнтованість сторін елементів на точність рішення?
16. Чим зумовлені похибки інтерполяції результатів чисельного рішення: різниця між по-вузловим і по-елементним наведенням результатів (на прикладі напружено-деформованого стану конструкції).
17. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в одній і тій самій моделі одночасно присутні елементи першого та другого порядків. Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому, та наведіть приклад.

18. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в одній і тій самій моделі одночасно присутні лінійні, балочні й поверхневі (оболонкові) елементи. Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому, та наведіть приклад.

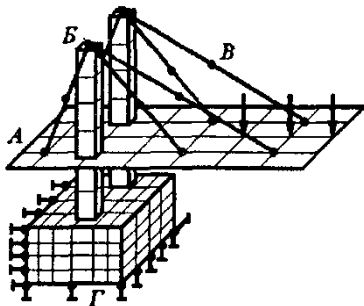
19. Який із перерахованих елементів є найбільш вдалим для моделювання симетричної тонкостінної ємності під тиском – дивись рисунок.



- а) балочний елемент;
 б) тримірний гексагональний елемент;
 в) тримірний тетрадральний елемент;
 г) 8-ми вузловий прямокутний двомірний елемент;
 е) поверхневий (оболонковий) елемент?

Поясніть свій вибір.

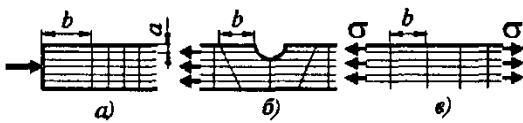
20. На разі статичного аналізу конструкції моста збільшення кількості яких із застосованих елементів може максимально підвищити точність результатів (дивись рисунок):



- А – оболонкових;
 Б – балочних;
 В – стрижневих;
 Г) тримірних?

Поясніть, чому.

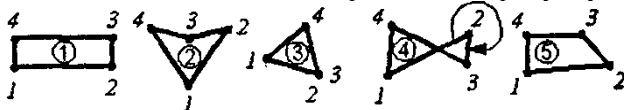
21. У якій із наведених схем можливе застосування «довгих» елементів ($b/a > 2$):



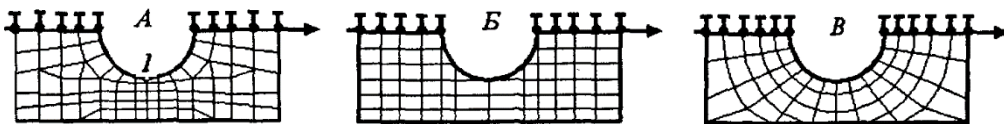
- а) на границі дії сили та/або граничних умов;
 б) у зонах концентрації напружень;
 в) в зоні постійних напружень;
 г) застосування таких елементів завжди призводить до помилок?

Поясніть, чому.

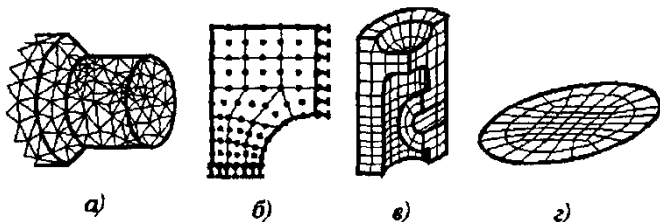
22. Які з елементів 1...5, зображених на рисунку, не є вірними? Чому?



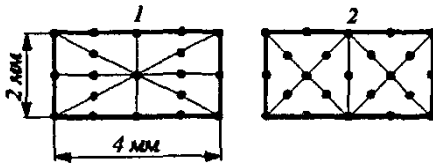
23. Яка з наведених на рисунку сіток А...В не є раціональною? Поясніть, чому.



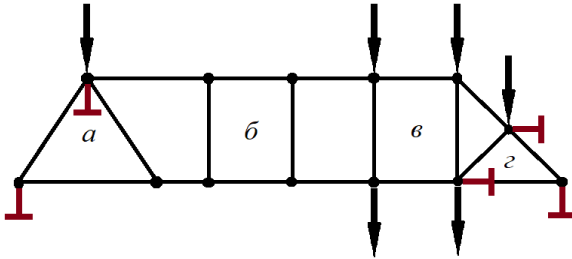
24. Які з наведених схем а...г відповідають довільній сітці, а які – впорядкованій? Поясніть, чому.



25. Яка з двох схем є переважною з точки зору точності результатів?



26. В якому з елементів $a...z$ граничні умови застосовано не вірно? Поясніть, чому і наведіть вірний варіант.



27. Призначення властивостей матеріалу, побудова залежностей одних властивостей від інших (наприклад, теплопровідності від температури, напруження від деформації і т. ін.).

28. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в моделі присутні елементи з нульовою жорсткістю ($E=0$). Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому та наведіть приклад

29. Розглядається наступний розрахунковий випадок: в моделі присутні елементи з нескінченною жорсткістю ($E=\infty$). Чи є можливим такий варіант з точки зору МКЕ? Поясніть, чому та наведіть приклад

30. Типи навантажень: локальні, розподілені, об'ємні, теплові, механічні і т. ін..

31. Способи призначення навантажень і закріплень: до примітивів кінцеве-елементної моделі (вузлів та елементів) або до геометричних примітивів (точок, ліній, поверхонь, об'ємів).

32. Що може спричинити нелінійність розрахункової моделі?

33. Особливості та порядок виконання розрахунку напружено-деформованого стану конструкції.

34. Особливості та порядок виконання розрахунку теплового стану конструкції.

35. Особливості та порядок виконання частотного аналізу конструкції.

36. Особливості та порядок виконання нелінійного аналізу конструкції.

37. Особливості та порядок розрахунку контактної задачі.

38. Використання результатів попередньо виконаного розрахунку, як навантажень у поточному аналізі.

39. Поняття ортотропії та анізотропії. Завдання властивостей подібних матеріалів.

11.3. Розподіл балів, які отримують студенти (кількісні критерії оцінювання)

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Модуль 1			
Змістовний модуль 1			
Робота на лекціях	1...1,5	8	8...12
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	2,5...4	12	30...48
Модульний контроль	22...40	1	22...40
Усього за семестр 1			60...100

Семестровий контроль (іспит) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску. Допуск до заліків надається за умов відпрацювання та здачі усіх практичних робіт, а також виконання та успішного захисту курсового проекту.

Під час складання семестрового заліку студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для заліків складається з трьох теоретичних запитань та одного практичного завдання. Питання по білетах розподілені таким чином:

11.4. Розподіл питань у білетах іспиту

Семестр	1-й
Тип контролю	Іспит
Теоретичні питання (<i>перше, друге, третє</i>)	Змістовий модуль 1
Четверте питання	Тематика практичних занять

Максимальна кількість балів за кожне теоретичне питання – 20, за практичне завдання – 40.

11.5. Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

знати:

- основи методу кінцевих елементів;
- рекомендації щодо побудови якісної сітки кінцевих елементів;
- основні правила обмеження ступенів свободи та/або навантаження розрахункової моделі;
- принципи та порядок виконання різних типів інженерних розрахунків методом кінцевих елементів в програмному пакеті ANSYS;

вміти:

- створювати розрахункові моделі деталей і вузлів АД та ЕУ на базі балочних, оболонкових, тримірних елементів або їх комбінації для виконання інженерних розрахунків у програмному пакеті ANSYS;
- виконувати розрахунки двовимірного та тривимірного температурного та напруженого стану деталей із використанням відповідних програмних засобів;
- проводити частотний аналіз конструкції та аналіз на втрату стійкості;
- виконувати критичний аналіз отриманих результатів щодо їх достовірності, тобто теорії або реального фізичного експерименту;
- самостійно визначати в складній конструкції зони «інтересу» для проведення подальшого аналізу відповідно до поставленої задачі;
- виконувати порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення за результатами виконаних розрахунків.

11.6. Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати необхідний мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та захистити індивідуальне завдання (курсний проект). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати, які типи інженерних задач можуть бути вирішені програмними продуктами на базі методу кінцевих елементів. Знати основну ідею методу кінцевих елементів. Розуміти різницю між елементами та вузлами. Орієнтуватися у інтерфейсі програмного продукту ANSYS та вміти пояснити, для чого призначені різні вікна та різні процесори програми. Бути спроможним виконувати прості міцнісні та теплові розрахунки окремих деталей типу балка або пластина за допомогою рекомендацій з навчальних посібників.

Добре (75-89). Твердо опанувати мінімум знань та умінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати хто або що сприяв розвиненню методу кінцевих елементів. Знати чим відрізняються елементи першого та другого порядків. Вміти самостійно налагоджувати прості моделі (типу балки, пластини тощо) до виконання усіх типів стаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Бути спроможним надавати оцінку вірності отриманих результатів – чи не протирічають вони теорії. Знати, що призводить до появи помилок у результатах розрахунків та розуміти їхнє чисельне співвідношення.

Відмінно (90-100). Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре або відмінно захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з відмінною оцінкою (припускається здати один з двох модулів з оцінкою «добре» і кількістю балів не менше 80). Повно знати основний та додатковий матеріал. Вміти робити вибір між елементами першого та другого порядків в залежності від отриманої задачі. Вміти самостійно налагоджувати складні моделі, у тому числі і складових вузлів з декількох окремих деталей, до виконання усіх типів стаціонарних та нестаціонарних розрахунків, розглянутих у змістових модулях. Розуміти різницю між окремими типами контактних граничних умов і вміти налагоджувати їх властивості. Вміти пояснювати та аналізувати отримані результати, розрізняти у них механічні та методологічні помилки підготовки розрахункової моделі. Пояснювати фізику симульованих процесів та пропонувати заходи з оптимізації моделі щодо її «полегшення», тобто зменшення часу на підготовку та розрахункового часу, а також щодо підвищення точності результатів симулювання.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка за національною шкалою	
	Для іспиту	Для заліку
90-100	Відмінно	Зараховано
75-89	Добре	
60-74	Задовільно	
01-59	Незадовільно	Не зараховано

12. Методичне забезпечення

1. <https://mentor.khai.edu/course/view.php?id=2785>.
2. Моделювання нестаціонарного термонапруженого стану елементів ГТД [Текст] : навч. посіб: до курс. та дипл. проектування / Є. В. Марценюк. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 88 с.
(http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Marcenuk_Modeluvanna.pdf).
3. Методичні розробки каф. 203 з методиками розрахунків та варіантами завдань.

13. Рекомендована література

Базова

1. ANSYS Mechanical User's Guide.

Допоміжна

2. Опір матеріалів: підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський [та інші]. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с.

14. Інформаційні ресурси

1. Розрахункові та контрольні програми ПЕОМ: ANSYS STUDENT
(<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>).
2. Файли та інтернет ресурси довідкової системі програмного комплексу ANSYS.