

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

Кафедра Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

 Олександр БІЛОГУБ
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 30 » 08 2023 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ВИБІРКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ
І ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК (КП)**

(назва навчальної дисципліни)

***MAJOR* Проєктування авіаційних двигунів та енергетичних установок**

Галузь знань: 13 Механічна інженерія
(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма: Авіаційні двигуни та енергетичні установки (ОПП, ОНП)
(найменування освітньої програми)

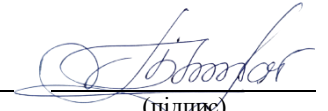
Форма навчання: денна

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

Харків 2023 рік

Розробники

Олексій Бондаренко, асистент
(ім'я та прізвище, посада, науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

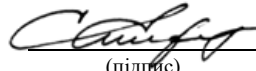
Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри

Конструкції авіаційних двигунів (№ 203)
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 30 » серпня 2024 р.

Завідувач каф. 203

д.т.н., професор
(науковий ступінь і вчене звання)


(підпис)

Сергій ЄПІФАНОВ
(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 – 2	Галузь знань: 13 <u>Механічна інженерія</u> (шифр і назва)	Вибіркова
Кількість модулів – 1	Спеціальність: 134 <u>Авіаційна та ракетно-космічна техніка</u> (шифр і назва)	Навчальний рік
Кількість змістових модулів – 1		2024 / 2025
Індивідуальне завдання: Курсовий проєкт: «Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни» <u> </u>		

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить

24 / 36

* 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 кваліфікованого конструювання термонапружених деталей авіаційних двигунів та енергетичних установок та уявлень про проектування систем охолодження двигунів та інших високотемпературних об'єктів енергетики.

Завдання: навчитися проектувати системи охолодження, знаходити, обґрунтовувати та обстоювати технічні рішення запроєктованих об'єктів; виконувати розрахунки теплового та термонапруженого стану деталей двигунів (лопаток турбін, дисків, оболонок ГТД, камер згоряння та ін.) засобами сучасних САПР; проводити математичне та комп'ютерне моделювання системи охолодження; виконувати оптимізацію та порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення, робити висновки з розрахунків та давати рекомендації по усуненню недоліків конструкції, виявлених розрахунками.

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

Загальні компетентності: Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми. Здатність дослідження на відповідному рівні. Здатність генерувати нові ідеї (креативність). Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології. Здатність вчитися та оволодівати сучасними знаннями. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

Спеціальні (фахові) компетентності: Усвідомлення історії, сучасного стану, проблем та перспектив розвитку авіаційної та ракетно-космічної техніки. Здатність критично осмислювати перспективи авіаційної та/або ракетно-космічної техніки, у тому числі на межі із суміжними галузями, інженерними науками, фізикою, хімією, екологією, економікою. Здатність обґрунтовувати вибір класу матеріалів для елементів конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки. Здатність оцінювати техніко-економічну ефективність проектування, досліджень, технологічних процесів та інноваційних розробок. Здатність створювати, удосконалювати та застосовувати математичні та числові методи моделювання властивостей, явищ та процесів у системах та елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки. Здатність поставити та вирішити професійні задачі на основі концептальних спеціалізованих знань.

Програмні результати навчання: Знати та розуміти засади фундаментальних та інженерних наук, що лежать в основі авіаційної та/або ракетно-космічної техніки. Знати та розуміти робочі процеси у системах і елементах авіаційної та/або ракетно-космічної техніки, необхідні для розуміння, опису, вдосконалення та оптимізації їх параметрів. Використовувати новітнє спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності відповідно до освітньої програми. Обґрунтовано призначати клас матеріалів для елементів та систем авіаційної та/або ракетно-космічної техніки, обирати та застосовувати ефективні методи модифікації їх властивостей. Застосовувати вимоги галузевих та міжнародних нормативних документів при формулюванні та розв'язанні науково-технічних задач проектування, виробництва, ремонту, складання, випробування та сертифікації елементів та об'єктів авіаційної та/або ракетно-космічної техніки на всіх етапах її життєвого циклу. Організовувати виконання складних завдань у професійній діяльності колективом. Розраховувати напружено-деформований стан, визначати несну здатність конструктивних елементів та надійність систем авіаційної та ракетно-космічної техніки з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, яке використовується в галузі.

Міждисциплінарні зв'язки:

Пре-реквізити: Теорія ВРД, Лопаткові машини, Механіка матеріалів і конструкцій, Деталі машин, Теоретична механіка, Матеріалознавство, Термодинаміка, Газодинаміка, Теплопередача, Прикладна математика, Комп'ютерно-інтегровані системи проектування.

Ко-реквізити: Ресурсне проектування і випробування АД і ЕУ, Дипломне проектування.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль 1

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ

Курсовий проєкт

Курсовий проєкт є самостійною роботою студента. Для керівництва, контролю та допомоги студенту призначається керівник курсового проєкту з числа викладачів.

Курсовий проєкт містить у собі створення розрахункової моделі робочої лопатки турбіни високого тиску, визначення необхідності впровадження охолодження та його типу, визначення граничних умов теплообміну, розрахунки теплового, напружено-деформованого та термонапруженого стану лопатки, визначення запасів міцності та оптимізація спроектованої системи охолодження робочої лопатки турбіни.

За бажанням студента та за згодою викладача завдання на курсовий проєкт може бути змінено у разі його відповідності до загального змісту даної дисципліни та збереженні обсягу й складності роботи.

Зміст курсового проєкту – базове завдання:

Числові методи в розрахунках на міцність.

Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна.

Створення геометричної моделі робочої лопатки ТВТ.

Призначення матеріалу лопатки, визначення його фізичних властивостей.

Визначення граничних умов теплообміну.

Розрахунок теплового стану робочої лопатки ТВТ.

Визначення силових навантажень.

Розрахунок термонапруженого стану робочої лопатки ТВТ.

Аналіз результатів та оптимізація системи охолодження лопатки.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
		л	п	лаб	с.р.
1	2	3	4	5	6
Модуль 1					
Змістовий модуль 1 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)					
Індивідуальне завдання	58	-	22	-	36
Курсовий проєкт на тему: “Розрахунок термонапруженого стану охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску газотурбінного двигуна”					
Контрольний захід	2	-	2	-	-
Разом за змістовим модулем 1	60	-	24	-	36
Усього годин	60	-	24	-	36

5. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)		
1	Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна. Вибір схеми охолодження. Розрахунки нагрівальної	4

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
	та охолодної температур. Уточнення витрати повітря на охолодження.	
2	Створення геометричної моделі робочої лопатки ТВТ. Розробка схеми підводу і розподілу повітря по перетину лопатки. Оцінка пропускної здатності каналів охолодження.	6
3	Призначення матеріалу лопатки, визначення його фізичних властивостей. Створення кінцево-елементної розрахункової сітки	2
4	Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішній поверхні лопатки. Визначення точок зміни ламінарного примежового шару в турбулентний. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі в каналах охолодження.	2
5	Розрахунок теплового стану лопатки ТВТ (охолоджуваний і неохолоджуваний варіанти)	2
6	Розрахунок термонапруженого стану лопатки ТВТ (охолоджуваний і неохолоджуваний варіанти).	2
7	Аналіз і оптимізація термонапруженого стану.	2
8	Розрахунок теплового і термонапруженого стану оптимального варіанту лопатки	2
9	Контрольний захід	2
	Разом	24

6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1		
Змістовий модуль 1 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)		
1	Виконання курсового проєкту	36
	Разом	36

7. Індивідуальне завдання

1. **Курсовий проєкт на тему:** «Розрахунок термонапруженого стану охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску газотурбінного двигуна».

Розділи роботи:

1. Аналіз конструкції турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна та узагальненого.
2. Побудова розрахункової кінцево-елементної моделі лопатки.
3. Визначення умов нагрівання з боку газового потоку.
4. Визначення умов охолодження з боку повітря.
5. Розрахунок теплового стану лопатки.
6. Визначення умов силового навантаження.
7. Розрахунок термонапруженого стану лопатки.
8. Аналіз результатів і оптимізація системи охолодження лопатки.
9. Розрахунок теплового стану диска ТВТ: стаціонарний та нестаціонарний аналізи.
10. Складання розрахунково-пояснювальної записки.

8. Методи навчання

Основні форми навчання:

- практичні роботи;
- курсовий проєкт;

- самостійна робота студента;
- залік.

Проведення практичних занять базується на індивідуальному виконанні студентами розрахунків теплового, напружено-деформованого й термонапруженого стану для деталей газотурбінних двигунів з 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 виконують курсовий проєкт.

9. Методи контролю

9.1. Тестування

Матеріал дисципліни складається з одного змістового модуля – курсовий проєкт на тему: “Розрахунок термонапруженого стану диска турбіни високого тиску”.

Складання модуля – на 38-му тижні 2-го семестру (один раз).

До складання диференційного заліку (захисту курсового проєкту) студент допускається за умови виконання всіх видів обов’язкових робіт, передбачених у модулі.

Строк захисту курсового проєкту – 38-й тиждень. Затримка захисту курсового проєкту на тиждень – мінус 2 бали, на 2 тижні – мінус 4 бали.

Семестр 2 – *диференційний залік*.

9.2. Питання для контролю та самостійної роботи студентів

Модуль 1

Змістовий модуль 1

1. Вплив охолодження деталей на термодинамічну досконалість і ресурс двигунів.
2. Аналіз умов роботи робочих лопаток газових турбін: зміна параметрів за профілем, тепловий стан лопаток.
3. Навантаження, що діють на лопатки турбін. Види пошкоджень лопаток.
4. Схеми систем охолодження лопаток та їх класифікація. Ефективність охолодження.
5. Конструкція конвективно охолоджуваних лопаток з поздовжньою течією охолоджувача.
6. Конструкція конвективно охолоджуваних лопаток з поздовжньо-поперечною течією охолоджувача.
7. Конструкція дефлекторних лопаток.
8. Конструкція лопаток із плівковим охолодженням.
9. Конструкція лопаток із пористим охолодженням.
10. Конструкція лопаток з транспіраційним (внутрішньостінковим) охолодженням.
11. Визначення розподілу температур у деталях. Рівняння теплопровідності, початкові та граничні умови.
12. Порядок розрахунку теплового стану деталей, що охолоджуються.
13. Теплові (температурні) процеси у примежовому шарі. Їхня кількісна оцінка. “Гріюча” температура для деталей у газовому потоці. Врахування температурної неоднорідності газового потоку в турбіні при визначенні «гріючої» температури.
14. Теплообмін у примежовому шарі. Коефіцієнт тепловіддачі: фізичний зміст, розрахунок за критеріальними залежностями, зв’язок із товщиною примежового шару.
15. Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі за профілем турбінної лопатки. Порядок величин.
16. Оцінка координати точки переходу ламінарного примежового шару в турбулентний.
17. Теплообмін у каналах охолодження. Характер примежового шару. Способи інтенсифікації теплообміну у каналах.
18. Критеріальні співвідношення визначення коефіцієнтів тепловіддачі в каналах.
19. Принцип прихованої деформації.

20. Способи усунення температурних напружень.
21. Розрахунок температурних напружень за стрижневою теорією. Формула Біргера-Малініна.
22. Побудова діаграми температура-напруження
23. Визначення запасів міцності у нерівномірно нагрітих деталях.
24. Оптимізація термонапруженого стану лопаток.

10. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

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

Семестровий контроль (диференційний залік) проводиться у формі публічного захисту курсового проекту. Допуск до захисту надається за умов відпрацювання та здачі усіх практичних робіт, а також виконання усіх частин проекту.

Під час захисту проекту студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Оцінка складається з таких частин:

- якість розробки та знання конструкції лопатки – 5 балів;
- якість виконання та знання креслення лопатки – 5 балів;
- складення та знання теплової моделі лопатки – 5 балів;
- визначення та задання граничних умов теплообміну лопатки – 15 балів;
- аналіз температурного стану лопатки – 10 балів;
- Визначення навантажень, що діють на робочу лопатку турбіни – 10 балів;
- складення та знання моделі напруженого стану лопатки – 10 балів;
- аналіз напруженого стану лопатки – 10 балів;
- оптимізація системи охолодження лопатки – 15 балів;
- систематичність роботи над виконанням проекту – 15 балів.

10.2. Якісні критерії оцінювання

Для одержання позитивної оцінки студент повинен

знати:

– головні чинники, що обумовлюють необхідність охолодження деталей газотурбінних двигунів;

- номенклатуру охолоджуваних деталей двигуна;
- типові схеми охолодження робочих лопаток турбін;
- умови функціонування термонапружених деталей газотурбінних двигунів;
- головні чинники напружень у робочих лопатках газових турбін;
- послідовність проектування систем охолодження деталей;
- природу виникнення температурних напружень в деталях ;
- конструктивні засоби зменшення температурних напружень;
- мету та головні елементи оптимізації системи охолодження;

вміти:

– визначати параметри граничних умов теплообміну деталей за заданими критеріальними співвідношеннями;

– виконувати розрахунки двовимірного та тривимірного температурного та напруженого стану деталей із використанням відповідних програмних засобів;

– виконувати порівняльну оцінку існуючих конструкцій, пропонувати шляхи їх вдосконалення за результатами виконаних розрахунків.

10.3. 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 вмінь. Відпрацювати та захистити всі практичні заняття. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати хто або що сприяв розвиненню метода 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

11. Методичне забезпечення

1. Епифанов, С.В. Расчет теплового и термонапряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин : учеб. пособие по курсовому и диплом. проектированию / С. В. Епифанов, Е. В. Марценюк. – Харьков : ХАИ, 2020. – 64 с

http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Epifanov_Raschet.pdf

2. Дидактичні матеріали (наочні посібники, плакати, ТЗН).

3. Розрізні макети газотурбінних двигунів в аудиторіях 103 та 124.

4. Методичні навчальні посібники за темами та розділами курсу.

5. Методичні розробки каф. 203 з методиками розрахунків та варіантами завдань.

12. Рекомендована література

Базова

1. Єпифанов, С. В. Проектирование охлаждаемых деталей ГТД : навч. посіб. [Текст] / С. В. Єпифанов, Є. В. Марценюк, І. Ф. Кравченко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", 2022. - 88 с.

http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Yepifanov_Proektuvanna_Oholoj_Det_GTD.pdf

2. Han, J.C. Gas turbine heat transfer and cooling technology. 2-nd edition [Text] / J.C. Han, S. Dutta, S. Ekkad. – CRC Press, Boca Raton, London. New York, 2013. – 843 p.

https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Oleynik_A.V._Teplovaya_Zashchita_Lopatok_Tu_rbin_Vozdushnymi_Zavesami.pdf

3. Єпіфанов, С. В. Конструкція авіаційних газотурбінних двигунів [Текст] : підручник / С. В. Єпіфанов, В. С. Чигрин. – Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авац. ін-т», 2022. – 336 с.

Допоміжна

1. ANSYS Mechanical User's Guide.
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.

13. Інформаційні ресурси

1. Розрахункові та контрольні програми ПЕОМ:
 - «Теплоотдача на наружной поверхности лопатки» (**gru**);
 - «Теплоотдача в каналах охлаждения» (**grydef**);
 - **ANSYS STUDENT**
 (<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>).
2. Файли та інтернет ресурси довідкової системи програмного комплексу ANSYS.