

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)

О. В. Білогуб
(ініціали та прізвище)

« » 2021 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ОБОВ'ЯЗКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Системи охолодження елементів АД і ЕУ

(назва навчальної дисципліни)

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»
(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти:
другий (магістерський)

Харків 2021 рік

Розробник: С. В. Єпіфанов, докт. техн. наук, професор
(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 « 30 » серпня 2021 р.

Завідувач кафедри 203, д.т.н., професор
(науковий ступінь і вчене звання)

 С. В. Єпіфанов
(підпис) (ініціали та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)
Кількість кредитів – 3	Галузь знань: 13 «Механічна інженерія» (шифр і назва)	Обов’язкова
Кількість модулів – 2	Спеціальність: 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (шифр і назва) Освітня програма: Авіаційні двигуни та енергетичні установки (назва)	Навчальний рік 2021 / 2022
Кількість змістових модулів – 2		Семестр
Індивідуальне завдання: Розрахунково-графічна робота на тему: «Розрахунок термонапруженого стану охолоджуваної лопатки» (назва)		
Загальна кількість годин – 40*/90		
Кількість тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 самостійної роботи студента – 3,125	Рівень вищої освіти: <u>другий (магістерський)</u>	1-й
		Лекції *
		32 год.
		Практичні, семінарські *
		8 год.
		Лабораторні *
		-
		Самостійна робота
50 год.		
Вид контролю		
Модульний контроль, іспит		

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить 48 / 87.

* 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: проектувати системи охолодження, знаходити, обґрунтовувати та обстоювати технічні рішення запроєктованих об'єктів; виконувати розрахунки тримірного теплового та термоміцнісного 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. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми. Здатність до проведення досліджень для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності. Здатність генерувати нові ідеї та реалізовувати їх у вигляді інноваційних рішень, працюючи у команді з залученням представників інших професійних груп. Навички використання новітніх інформаційних технологій. Здатність до подальшого автономного та самостійного навчання на основі новітніх науково-технічних досягнень.*

Спеціальні (фахові) компетентності: *Орієнтування в історії, сучасному стані, проблемах та перспективах розвитку авіаційної та ракетно-космічної техніки. Здатність кваліфіковано обирати клас матеріалів для елементів конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки, у тому числі за нечітких умов і вимог. Усвідомлення робочих процесів у системах та елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки, необхідних для розуміння, опису, вдосконалення об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки та оптимізації їх параметрів. Здатність ставити та вирішувати професійні задачі на основі знань та розуміння гідравлічних, пневматичних, електричних та електронних систем.*

Програмні результати навчання: *Вміння розв'язувати складні інженерні завдання і проблеми авіаційної та / або ракетно-космічної техніки, що потребує оновлення та інтеграції знань, у тому числі в умовах неповної / недостатньої інформації та суперечливих вимог. Вміння використовувати новітнє спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності відповідно до освітньої програми. Готовність до подальшого навчання у сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки, механічної інженерії і дотичних галузей знань, яке значною мірою є автономним та самостійним. Вміння аналізувати передові наукові та технічні досягнення в галузі проектуванні та виробництва елементів та об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки в умовах різних етапів розвитку, використовуючи історичну, патентну та науково-технічну літературу. Вміння обґрунтовано призначати клас матеріалів для елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки, мати навички вибору методів модифікації їх властивостей. Навички організації виконання складних завдань у професійній діяльності шляхом послідовного та якісного виконання їхніх окремих етапів, в тому числі з залученням колективу виконавців. Вміння обчислювати напружено-деформований стан, визначати несінну здатність конструктивних елементів та надійність систем авіаційної та ракетно-космічної техніки та засобів промислового виробництва з використанням новітнього програмного забезпечення, яке використовується в галузі. Вміння формулювати та розв'язувати науково-технічні задачі з розроблення новітніх зразків систем та елементів авіаційної та ракетно-космічної техніки на основі знань та розуміння особливостей їх конструкції та робочих процесів.*

Міждисциплінарні зв'язки: теорія ВРД, лопаткові машини, опору матеріалів, деталі машин, теоретична механіка, матеріалознавство, газодинаміка, теплопередача, прикладна математика, Ресурсне проектування і випробування АД і ЕУ.

3. Програма навчальної дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль 1

ТЕПЛОВИЙ ЗАХИСТ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНА

Лекційні заняття

ТЕМА 1. Предмет вивчення та задачі дисципліни. Місце дисципліни в учбовому плані. Рекомендована література. Охолодження камер згоряння і турбін, захист від намерзання криги, забезпечення та регулювання зазорів у компресорах і турбінах, випромінювання сопел та ін. Виникнення у деталях температурних напруг, повзучості та малоциклової втоми. Проблема джерел холоду та холодоагентів на літальному апараті. Атмосферне повітря, повітря проточної частини, паливо, другі рідини.

ТЕМА 2. Теплові умови функціонування термонапружених деталей та вузлів АД. Аналіз умов роботи соплових та робочих лопаток турбін. Профіль проточної частини та зміна параметрів. Тепловий стан лопаток. Навантаження, що діють на лопатки. Аналіз умов роботи дисків турбін. Профіль диска. Розподіл температури. Наявність концентраторів. Навантаження, що діють на диски. Аналіз умов роботи, теплового стану та навантажень, що діють на корпуси турбін. Теплові умови та навантаження на опорні вузли двигунів.

ТЕМА 3. Типові та перспективні види і схеми теплового захисту (охолодження). Основні елементи системи теплового захисту. Технічні характеристики систем охолодження. Конвекційне охолодження. Конструкція систем конвекційного охолодження. Засоби інтенсифікації тепловіддачі. Концепція загороджувального захисту. Перфораційні пояси. Технічні характеристики завіс. Тангенціальний (щільний) вдув повітря. Перфораційний вдув. Вдув через пористу ділянку. Сучасні технологічні можливості та обмеження для елементів системи охолодження АД. Перспективні види теплового захисту. Віхрові та теплові трубки, смерчове охолодження та ін. Особливості розрахунку лопаток з бандажними полицями, нерівномірно нагрітих лопаток.

ТЕМА 4. Математичне та комп'ютерне моделювання систем охолодження. Основні етапи розрахунку системи охолодження. Перевірочний та проектувальний розрахунки. Математична модель гідравліки системи охолодження. Комп'ютерні методи розрахунку.

ТЕМА 5. Основи конвективного теплообміну. Феноменологічний підхід до опису явищ у пограничному шарі. Теплообмін у ламінарному і турбулентному пограничних шарах. Критеріальні співвідношення для визначення товщини пограничного шару та інтенсивності теплообміну.

ТЕМА 6. Особливості теплообміну охолоджуваних деталей ГТД. Газодинамічні та теплові процеси у пограничному шарі. Моделі «гріючої» температури газу. Температура адіабатної стінки. «Гріюча» температура пульсуючого потоку. Сегрегація газового потоку в міжлопаточному каналі робочого колеса турбіни. Зовнішній теплообмін лопаток. Розрахункові моделі тепловіддачі. Розрахунки тепловіддачі у каналах охолодження. Вплив обертання. Модель пограничного шару при щільному, перфораційному, та пористому вдуві. Умови течії завіси без відриву від поверхні, з поверненням на поверхню, з виникненням суцільної пелени.

ТЕМА 7. Розрахунки ефективності загороджувального охолодження. Ефективність щілинної завіси. Формула С.С. Кутателадзе – А.І. Леонтьєва. Ефективність перфораційної завіси. Ефективність пористого вдування (завіси). Порівняння різних типів завіс. Сумісна дія декількох видів охолодження. Формула Селлєрса.

Модульний контроль

Модуль 2

Змістовий модуль 2

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ

Лекційні заняття

ТЕМА 8. Термоміцнісні явища: термічні напруження в ізотермічних деталях, при нерівномірному нагріві, при термоударі. Малоциклова термічна втома. Сили міжмолекулярної та міжатомної взаємодії. Теоретична межа міцності. Закон Гука. Потенційна енергія міжмолекулярної взаємодії. Вільне теплове розширення. Термічні напруження.

ТЕМА 9. Термічні напруження у стрижнях. Термічні напруження в кільцях та дисках. Принцип схованої деформації. Засоби зменшення температурних напружень в деталях та вузлах двигунів.

ТЕМА 10. Розрахункові схеми теплового навантаження вузлів АД. Робочі лопатки турбін. Диски турбін. Корпуса деталей гарячої частини.

ТЕМА 11. Фізичні основи розрахунків термічних напружень. Міжмолекулярні сили. Теплове поширення. Тепловий тиск. Виникнення термічних напружень. Пружно-геометричні характеристики плоского перерізу у неоднорідному полі температур. Вісь та центр термонапруженої жорсткості. Центральні та головні вісі термонапруженої жорсткості. Їх положення. Зміна положення при локальному нагріві. Стрижнева теорія розрахунків на міцність при неоднорідному нагріві. Розтяг при неоднорідному нагріві. Вигин при неоднорідному нагріві. Формула Біргера-Малініна для температурних напружень у лопатках. Оцінка термічних напружень у типових випадках. Спрощені формули.

ТЕМА 12. Оптимізація термонапруженого стану робочих лопаток турбін. Оптимізація термонапруженого стану дисків турбін.

Модульний контроль

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин				
	денна форма				
	усього	у тому числі			
		л	п	лаб	с.р.
1	2	4	5	6	7
Модуль 1					
Змістовий модуль 1 (ТЕПЛОВИЙ ЗАХИСТ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНА)					
ТЕМА 1. Вступ до дисципліни. Проблеми теплового та термонапруженого стану деталей авіаційних двигунів	3	2	-	-	1
ТЕМА 2. Теплові умови функціонування термонапружених деталей та вузлів АД	4	2	-	-	2
ТЕМА 3. Типові та перспективні види і схеми теплового захисту (охолодження)	6	4	-	-	2
ТЕМА 4. Математичне моделювання систем охолодження	5	2	2	-	1
ТЕМА 5. Основи конвективного теплообміну	4	2	-	-	2
ТЕМА 6. Особливості теплообміну охолоджуваних деталей ГТД	5	4	-	-	1
ТЕМА 7. Розрахунки ефективності систем загороджувального охолодження	5	2	2	-	1
Модульний контроль	1	1	-	-	-
Разом за змістовим модулем 1	33	19	4	-	10
Модуль 2					
Змістовий модуль 2 (ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ АД ТА ЕУ)					
ТЕМА 8. Фізичні основи виникнення термічних напружень	4	2	-	-	2
ТЕМА 9. Конструювання термонапружених елементів АД	4	2	-	-	2
ТЕМА 10. Розрахункові схеми теплового навантаження вузлів АД	6	2	2	-	2
ТЕМА 11. Напружений стан при неоднорідному нагріві	6	4	-	-	2
ТЕМА 12. Оптимізація термонапруженого стану	6	2	2	-	2
Модульний контроль	1	1	-	-	-
Разом за змістовим модулем 2	27	13	4	-	10
Індивідуальне завдання					
Розрахунково-графічна робота на тему: "Розрахунок термонапруженого стану охолоджуваної лопатки"	30	-	-	-	30

Контрольний захід					
Усього годин	90	32	8	-	50

5. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Конструкція систем охолодження двигунів	-
2	Конструкція охолоджуваних лопаток	-
3	Математичне моделювання систем охолодження	2
4	Конструювання термонапружених елементів АД	2
5	Температурні напруження в охолоджуваних лопатках	2
6	Оптимізація термонапруженого стану охолоджуваної лопатки	2
	Разом	8

6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Проблеми теплового та термонапруженого стану деталей авіаційних двигунів	1
2	Теплові умови функціонування термонапружених деталей та вузлів АД	2
3	Типові та перспективні види і схеми теплового захисту (охолодження)	2
4	Математичне моделювання систем охолодження	1
5	Основи конвективного теплообміну	2
6	Особливості теплообміну охолоджуваних деталей ГТД	1
7	Розрахунки ефективності систем загороджувального охолодження	1
8	Фізичні основи розрахунків термічних напруг. Міжмолекулярні сили. Теплове поширення. Тепловий тиск. Виникнення термічних напруг	2
9	Термічні напруження в кільцях та дисках. Малоциклова термічна втома. Принцип схованої деформації	2
10	Стрижнева теорія розрахунків на міцність при неоднорідному нагріві. Розтяг при неоднорідному нагріві	2
11	Вигин при неоднорідному нагріві	2
12	Оптимізація термонапруженого стану	2
13	Виконання розрахунково-графічної роботи	30
	Разом	50

7. Розрахунково-графічна робота

1. «Розрахунок термонапруженого стану охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску газотурбінного двигуна».

Розділи роботи:

1. Складання розрахункової схеми лопатки.
2. Побудова твердотільної моделі лопатки.
3. Визначення силових навантажень.
4. Визначення умов нагріву з боку газового потоку.
5. Визначення умов охолодження з боку повітря.

8. Методи навчання

Основні форми навчання:

- лекційна;
- практичні роботи;
- лабораторні роботи;
- розрахунково-графічна робота;
- самостійна робота студента;
- іспит.

На лекціях студентів даються основні поняття, основи теорії, закономірності, необхідні для підготовки до виконання практичних та лабораторних робіт, самостійної роботи, а також виконання індивідуального завдання.

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

Проведення лабораторних робіт базується на словесному (аналітичному) описанні об'єкта (системи охолодження та охолоджуваних деталей), а також й на матеріальному його відображенні за допомогою спеціальних дидактичних матеріалів (розрізні макети, плакати та ін.). Під час проведення лабораторних робіт використовується бригадний характер праці студентів.

Проведення практичних робіт базується на виконанні студентами розрахунків параметрів систем охолодження та термонапруженого стану деталей.

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 лабораторних робіт, виконують домашню розрахунково-графічну роботу.

Питання для самостійної роботи студентів

Модуль 1

1. Влияние охлаждения деталей на термодинамическое совершенство и ресурс двигателей.
2. Анализ условий работы рабочих лопаток газовых турбин: изменение параметров по профилю, тепловое состояние лопаток.
3. Нагрузки, действующие на лопатки турбин. Виды повреждений лопаток.
4. Анализ условий работы дисков газовых турбин: изменение параметров по профилю, тепловое состояние дисков.
5. Нагрузки, действующие на диски турбин. Виды повреждений дисков.
6. Анализ условий работы, теплового состояния и нагрузок, действующих на корпуса турбин.
7. Схемы систем охлаждения лопаток и их классификация. Эффективность охлаждения.
8. Конструкция конвективно охлаждаемых лопаток с продольным течением охладителя.
9. Конструкция конвективно охлаждаемых лопаток с продольно-поперечным течением охладителя.
10. Конструкция дефлекторных лопаток.
11. Конструкция лопаток с пленочным охлаждением.
12. Конструкция лопаток с пористым охлаждением.
13. Конструкция лопаток с транспирационным (внутрискрипичным) охлаждением.
14. Требования к конструкции и тенденции развития систем охлаждения.
15. Определение распределения температур в деталях. Уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия.
16. Порядок расчета теплового состояния охлаждаемых деталей.
17. Гидравлический расчет внутренней воздушной системы двигателя. Составление расчетной схемы и основные формулы, используемые в расчете.
18. Тепловые (температурные) процессы в пограничном слое. Их количественная оценка. «Греющая» температура для деталей в газовом потоке. Учет температурной неоднородности газового потока в турбине при определении «греющей» температуры.
19. Теплообмен в пограничном слое. Коэффициент теплоотдачи: физический смысл, расчет по критериальным зависимостям, связь с толщиной пограничного слоя.
20. Распределение коэффициентов теплоотдачи по профилю турбинной лопатки. Порядок

величин.

21. Оценка координаты точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный.
22. Задание граничных условий на поверхности лопатки.
23. Теплообмен в каналах охлаждения. Характер пограничного слоя. Способы интенсификации теплообмена в каналах.
24. Критериальные соотношения для определения коэффициентов теплоотдачи в каналах.
25. Конвективно-пленочное (заградительное) охлаждение. Характер течения при перфорационном охлаждении.
26. Процессы при подаче охлаждающего воздуха через щель. Параметр вдува и его влияние на характер течения за отверстием.
27. Расчет эффективности щелевого охлаждения. Формула Кутателадзе-Леонтьева.
28. Расчет эффективности перфорационного охлаждения. Приведение к эквивалентному щелевому охлаждению.
29. Расчет эффективности многорядных завес.

Модуль 2

1. Основные термopочностные явления: изотермичный (стесненный) стержень.
2. Принцип скрытой деформации.
3. Основные термopочностные явления: неизотермичный бандажированный стержень.
4. Основные термopочностные явления: стержень со свободным торцом.
5. Основные термopочностные явления: термоудар, малоцикловая термическая усталость.
6. Устранение температурных напряжений телескопическим закреплением жаровой трубы.
7. Устранение температурных напряжений лучевым закреплением жаровой трубы.
8. Устранение температурных напряжений путем рассечения зоны экстремальных температур.
9. Устранение температурных напряжений путем рассечения детали на изотермичные зоны.
10. Устранение температурных напряжений выводением температурных перемещений с линии закрепления.
11. Устранение температурных напряжений в отверстиях жаровой трубы.
12. Упруго-геометрические характеристики неравномерно нагретых сечений. Центральные и главные оси инерции.
13. Упруго-геометрические характеристики неравномерно нагретых сечений. Влияние неравномерного нагрева на положение осей термоупругой жесткости.
14. Расчет температурных напряжений по стержневой теории. Формула Биргера-Малинина.
15. Термические напряжения в неравномерно нагретых кольцах.
16. Построение поля температур и напряжений в детали на диаграмме температура-напряжения.
17. Определение запасов неравномерно нагретых деталей.
18. Оптимизация термонапряженного состояния лопаток.

9. Методи контролю

Матеріал дисципліни розбито на два змістових модулі:

1. Тепловий захист елементів двигуна.
2. Термонапружений стан елементів АД та ЕУ.

Складання модуля 1 – на 9-му тижні (один раз), складання модуля 2 – на 16-му тижні (один раз).

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

Оформлення лабораторних робіт – *письмово*, захист – *усно*.

Строк захисту домашнього завдання – 15-й тиждень. Затримка захисту домашнього завдання на тиждень – мінус 2 бали, на 2 тижні – мінус 4 бали.

Семестр 1 – *іспит*.

10. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

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

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Змістовний модуль 1			
Робота на лекціях	0...0,5	10	0...5
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	2...4	3	8...12
Модульний контроль	14...23	1	14...23
Змістовний модуль 2			
Робота на лекціях	0...0,5	6	0...3
Виконання і захист лабораторних (практичних) робіт	2...4	3	8...12
Модульний контроль	14...23	1	14...23
Виконання і захист РГР	16...22	1	16...22
Усього за семестр			60...100

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

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

Білет для іспиту складається з трьох теоретичних запитань та одного практичного завдання. Теоретичні запитання розподілено таким чином:

Перше запитання - змістовий модуль 1;

Друге запитання – змістовий модуль 2;

Третє запитання – тематика розрахунково-графічної роботи.

Практичне завдання стосується оптимізації системи охолодження робочої лопатки турбіни і надається у вигляді готової діаграми температура – напруження, яку необхідно проаналізувати та сформулювати пропозиції щодо удосконалення системи охолодження.

Максимальна кількість балів за кожне запитання – 25.

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 лабораторні та практичні роботи. Виконати та захистити індивідуальне завдання (розрахунково-графічну роботу). Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати схеми охолодження деталей. Уміти визначити тип охолодження лопатки турбіни за її натурним зразком або кресленням. Пояснювати вибір місця відбору охолоджуючого повітря. Пояснювати, який знак мають температурні напруження в області кромки та центральній частині лопатки на перехідних режимах роботи двигуна. Пояснювати причини перерозподілу напружень у деталі при виникненні нерівномірного розподілу температури за перерізом.

Добре (75-89). Твердо опанувати мінімум знань та вмінь. Відпрацювати та захистити всі лабораторні та практичні роботи. Виконати та добре захистити індивідуальне завдання. Здати модульне тестування з позитивною оцінкою. Знати тенденції зростання температури перед турбіною та внесок у цей процес розвитку систем охолодження. Знати типові схеми охолодження лопаток. Вміти визначити тип охолодження лопатки турбіни за її натурним зразком або кресленням. Знати основні етапи розрахунку систем охолодження. Вміти визначати зону переходу від ламінарного пограничного шару до турбулентного на поверхні лопатки. Вміти визначати параметри граничних умов теплообміну на зовнішній та внутрішній поверхнях охолоджуваних деталей за заданими критеріальними співвідношеннями. Знати основні типи течії охолоджуючого повітря при перфораційному охолодженні та вплив на них параметра вдування. Пояснювати умови та механізм виникнення температурних напружень. Пояснювати причини перерозподілу напружень у деталі при виникненні нерівномірного розподілу температури за перерізом. Виконувати аналіз поточного стану та виробляти рекомендації щодо оптимізації системи охолодження деталі, користуючись діаграмою температура-напруження.

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. Пояснювати вплив охолодження на термодинамічну ефективність двигуна. Знати умови роботи лопаток, дисків та корпусів турбін, які спричиняють необхідність охолодження. Знати головні втрати, пов'язані з охолодженням деталей двигунів. Виконувати аналіз переваг та недоліків усіх схем охолодження лопаток. Виконувати розрахунки граничних умов теплообміну та тривимірні розрахунки температур та напружень. Знати теорію загороджувального охолодження. Пояснювати фізичні чинники виникнення температурних напружень та методи їх усунення. Володіти основами аналізу деталей з нерівномірним розподілом температури за перерізами. Володіти основами оптимізації систем охолодження.

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. Дидактичні матеріали (наочні посібники, плакати, ТЗН).
2. Розрізні макети газотурбінних двигунів в аудиторіях 103 та 124.
3. Методичні навчальні посібники за темами та розділами курсу.
4. Розрахункові та контрольні програми ПЕОМ:
 - «Теплоотдача на наружной поверхности лопатки» (gru);
 - «Расход воздуха» _gas);
 - «Заградительное охлаждение» _bog);
 - «Графическое редактирование» (kanalw);
 - «Создание расчетной сетки» (grid1);
 - «Изображение расчетной сетки» (v_gri);

- «Расчет температурного поля» (grid2);
 - «Изображение поля» (lun);
 - «Расчет напряженного состояния» (grid3).
5. Методичні розробки каф. 203 з методиками розрахунків та варіантами завдань.

12. Рекомендована література

Базова

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2007. – 204 с.
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.
3. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных установок: Учебник для вузов [Текст] / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, Л.И. Осипов; Под ред. А.И. Леонтьева. – 2-е изд., стереотип. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 592 с.
4. Олейник А.В. Тепловая защита лопаток турбин воздушными завесами. Консп. лекций [Текст] / А.В. Олейник. – Харьков: Гос. аэрокосмич. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1999. – 36 с.
5. Олейник А.В. Температурные напряжения в деталях газотурбинных двигателей. Конспект лекций [Текст] / А.В. Олейник. – Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2002. – 65 с.
6. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели [Текст] : в 5 кн. / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. П. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2008. – Кн. 2 : Компрессоры. Камеры сгорания. Турбины. Выходные устройства. – 367 с.
7. Чигрин, В.С. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.С. Чигрин. – Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2019. – 265 с.

Допоміжна

8. Олейник А.В. Расчет теплового и напряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин [Текст]: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию / А.В. Олейник, С.Ю. Шарков. – Харьков: Гос. аэрокосмич. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1995. – 61 с.
9. Биргер И.А. Сопротивление материалов [Текст] : учеб. пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
10. Копелев С.З. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД [Текст] / С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко. – Харьков.: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1994. – 240 с.
11. Локай В.И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов [Текст] / В.И. Локай, М.К. Максимова, В.А. Струнkin. – М.: Машиностроение, 1979. – 447 с.
12. Основы проектирования турбин авиадвигателей [Текст] / под ред. С.З. Копелева. – М.: Машиностроение, 1988.
13. Фрид А.М. Охлаждаемые турбинные лопатки высокотемпературных газотурбинных двигателей [Текст] : учеб. пособие/ А.М. Фрид, В.Г. Богданов. – Харьков. ХАИ, 1973.
14. Швец И.Т. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин [Текст] / И.Т. Швец, Е.П. Дыбан. – Киев: Наукова думка, 1974. – 487 с. – 487 с.
15. Богомолов Е.Н. Рабочие процессы в охлаждаемых турбинах газотурбинных двигателей с перфорированными лопатками [Текст] / Е.Н. Богомолов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
16. Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. – М.: Энергия, 1972. – 344 с.
17. Манушин Э.А. Системы охлаждения турбин высокотемпературных газотурбинных двигателей [Текст] / Э.А. Манушин // Итоги науки и техники. Сер. Турбостроение. Т.2. М.: Энергия, 1972. – 344 с.
18. Репухов В.М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа [Текст] / В.М. Репухов. – Киев.: Наукова думка, 1980. – 296 с.