

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

*Кафедра конструкції авіаційних двигунів (№ 203)*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Керівник проектної групи

  
(підпис)

Г. О. Горбенко  
(ініціали та прізвище)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА *ВИБІРКОВОЇ* НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**КОНСТРУКЦІЯ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ ТА ЕУ**

(назва навчальної дисципліни)

|                     |                                                                        |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Галузь знань        | <u>14 «Електрична інженерія»</u><br>(шифр і найменування галузі знань) |
| Спеціальність       | <u>144 «Теплоенергетика»</u><br>(код та найменування спеціальності)    |
| Освітня програма    | <u>Енергетичний менеджмент</u><br>(найменування спеціальності)         |
| Форма навчання      | <u>денна</u>                                                           |
| Рівень вищої освіти | <u>перший (бакалаврський)</u>                                          |

**Харків 2019 рік**

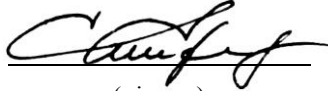
Робоча програма Конструкція теплових двигунів та ЕУ  
(назва дисципліни)  
для студентів за спеціальністю 144 «Теплоенергетика»  
освітніми програмами Енергетичний менеджмент

« 1 » червня 2019 р, 7 с.

Розробник: Єніфанов Костянтин Сергійович, к.т.н., доцент  
(прізвище та ініціали, посада, наукова ступінь та вчене звання)  (підпис)

Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри  
конструкції авіаційних двигунів  
(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 30 » серпня 2019 р.

Завідувач кафедри д.т.н., професор  
(наукова ступінь та вчене звання)  (підпис) С. В. Єніфанов  
(ініціали та прізвище)

## 1. Опис навчальної дисципліни

| Найменування показників                                                                                                 | Галузь знань, напрям підготовки (спеціальність, спеціалізація), рівень вищої освіти | Характеристика навчальної дисципліни                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                         |                                                                                     | денна форма навчання                                                                    |
| Кількість кредитів – 4                                                                                                  | <b>Спеціальність:</b><br><u>144</u><br><u>«Теплоенергетика»</u><br>(шифр і назва)   | Цикл професійної підготовки (Дисципліна самостійного вибору вищого навчального закладу) |
| Кількість модулів – 2                                                                                                   | <b>Освітня програма:</b><br><br><u>«Енергетичний менеджмент»</u><br>( назва)        | <b>Навчальний рік</b><br>2019 / 2020                                                    |
| Кількість змістових модулів – 2                                                                                         |                                                                                     | <b>Семестр</b>                                                                          |
| <b>Індивідуальне завдання</b><br><i>немає</i><br>(назва)                                                                |                                                                                     |                                                                                         |
| <b>Загальна кількість годин – 48*/120</b>                                                                               |                                                                                     |                                                                                         |
| <b>Кількість тижневих годин для денної форми навчання:</b><br><br>аудиторних – 4<br><br>самостійної роботи студента – 6 | <b>Рівень вищої освіти:</b><br><br><u>перший (бакалаврський)</u>                    | 8-й                                                                                     |
|                                                                                                                         |                                                                                     | <b>Лекції *</b>                                                                         |
|                                                                                                                         |                                                                                     | 24 год.                                                                                 |
|                                                                                                                         |                                                                                     | <b>Практичні, семінарські *</b>                                                         |
|                                                                                                                         |                                                                                     | 24 год.                                                                                 |
|                                                                                                                         |                                                                                     | <b>Лабораторні *</b>                                                                    |
|                                                                                                                         |                                                                                     | -                                                                                       |
|                                                                                                                         |                                                                                     | <b>Самостійна робота</b>                                                                |
|                                                                                                                         |                                                                                     | 72 год.                                                                                 |
|                                                                                                                         |                                                                                     | <b>Вид контролю:</b><br>залік                                                           |

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить:  
для денної форми навчання (У) – 48 / 72.

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

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета навчання:** дати знання по використанню сучасних методик розрахунків на міцність головних конструктивних елементів теплових двигунів та енергетичних установок, аналізу їх конструктивних особливостей, проектуванню їх деталей та вузлів.

**Завдання:** формування навичок щодо проектування головних конструктивних елементів теплових двигунів та енергетичних установок.

**Результати навчання:** у результаті вивчення навчальної дисципліни студент буде здатен:

- демонструвати знання і розуміння конструкцій авіаційних двигунів та енергоустановок;
- виявляти, формулювати і вирішувати інженерні завдання;
- здійснювати пошук необхідної інформації в технічній літературі, використовувати наукові бази даних та інші відповідні джерела інформації;
- мати практичні навички вирішення завдань, що передбачають реалізацію інженерних проектів і проведення досліджень;
- демонструвати розуміння застосовуваних методик проектування і дослідження, а також їх обмежень.

**Міждисциплінарні зв'язки:** прикладна гідрогазодинаміка, теорія робочих процесів теплових машин, теорія та розрахунок лопатевих машин, механіка матеріалів та конструкцій, деталі машин та основи конструювання, інженерне матеріалознавство.

## 3. Програма навчальної дисципліни

### Модуль 1

#### Змістовий модуль 1

**ТЕМА 1.** Вступ. Історія виникнення теплових двигунів. Загальні відомості про авіаційні силові установки (СУ). Склад СУ. Принцип дії та класифікація газотурбінних (ГТД), поршневих (ДВЗ) та ракетних (РД) двигунів.

**ТЕМА 2.** Загальні питання компоновання ГТД. Вибір конструктивно - компоновочної схеми. Визначення силової схеми ГТД. Основні вимоги. Склад силових схем ротора і корпусу.

**ТЕМА 3.** Загальна характеристика силових схем роторів. Класифікація роторів за кількістю опор. З'єднання валів багатоопорних роторів.

**ТЕМА 4.** Загальна характеристика силових схем корпусів. Класифікація ГТД по способам з'єднання корпусів турбін, компресорів та камер згоряння. Порівняння силових схем ГТД.

**ТЕМА 5.** Компресори газотурбінних двигунів. Ступені компресора. Робочий процес в ступені. Зусилля, що діють на лопатку. Конструкції лопаток. Зазори. Матеріали виготовлення.

**ТЕМА 6.** Турбіни газотурбінних двигунів. Ступені турбіни. Робочий процес в ступені. Зусилля, що діють на лопатку. Конструкції лопаток. Зазори. Матеріали виготовлення.

**ТЕМА 7.** Класифікація зусиль, що діють в ГТД, за походженням і за напрямком. Визначення осьового зусилля, що діє на елементи конструкції двигуна. Підсумовування осьових зусиль на роторах та на корпусах.

Визначення крутних моментів, що діють на елементи конструкції двигуна. Підсумовування крутних моментів, що діють на ротор двигуна і на його корпус.

### Модуль 2

#### Змістовий модуль 2

**ТЕМА 8.** Вимоги до робочих лопаток і особливості їх проектування. Сили, що діють на робочу лопатку. Напруги розтягнення від відцентрових сил в довільному перерізі лопатки. Вплив бандажної полиці на величину і розподіл напружень розтягу в перерізі лопатки.

**ТЕМА 9.** Схема дії згинальних аеродинамічних сил на робочі лопатки компресора і турбіни. Напруження згину в довільній точці профілю лопатки. Компенсація вигину від аеродинамічних сил лопатки відцентровими силами.

**ТЕМА 10.** Температурні напруги в лопатках турбін. Основні допущення при розрахунку температурних напружень. Розподіл термічних напружень по ширині лопатки при нерівномірному нагріванні. Оцінка запасів міцності робочих лопаток компресора і турбіни.

**ТЕМА 11.** Основні вимоги до конструкції дисків. Умови роботи дисків ГТД і зусилля, що діють на диски. Основні допущення при розрахунку дисків на міцність, мета розрахунку. Граничні умови в розрахунках дисків на міцність.

**ТЕМА 12.** Рівняння радіального рівноваги елемента диска. Складання рівняння спільності деформацій. Розподіл напружень в дисках різних форм. Вплив маточини на розподіл напружень в диску.

**ТЕМА 13.** Температурні напруги в дисках. Вплив нерівномірності нагріву диска на розподіл температурних напружень. Методи оцінки запасів міцності дисків. Розрахункові режими для визначення запасів міцності дисків.

**ТЕМА 14.** Камери згоряння ГТД. Вихідні пристрої ГТД

#### 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         |
| <b>Модуль 1</b>                                                                                                                               |                 |              |           |          |           |
| <b>Змістовий модуль 1</b>                                                                                                                     |                 |              |           |          |           |
| <b>ТЕМА 1.</b> Вступ. Історія виникнення теплових двигунів. Авіаційні силові установки                                                        | 6               | 1            | -         | -        | 5         |
| <b>ТЕМА 2.</b> Загальні питання конструювання ГТД                                                                                             | 5               | 1            | -         | -        | 4         |
| <b>ТЕМА 3.</b> Характеристика силових схем роторів                                                                                            | 10              | 1            | 3         | -        | 6         |
| <b>ТЕМА 4.</b> Характеристика силових схем корпусів                                                                                           | 10              | 2            | 2         | -        | 6         |
| <b>ТЕМА 5.</b> Компресори газотурбінних двигунів                                                                                              | 11              | 2            | 3         | -        | 6         |
| <b>ТЕМА 6.</b> Турбіни газотурбінних двигунів                                                                                                 | 9               | 2            | 3         | -        | 4         |
| <b>ТЕМА 7.</b> Визначення осьових зусиль та крутних моментів, що діють на конструкції ГТД                                                     | 8               | 2            | -         | -        | 6         |
| <b>Модульний контроль</b>                                                                                                                     | 1               | 1            | -         | -        | -         |
| <b>Разом за змістовим модулем 1</b>                                                                                                           | <b>60</b>       | <b>12</b>    | <b>11</b> | <b>-</b> | <b>37</b> |
| <b>Модуль 2</b>                                                                                                                               |                 |              |           |          |           |
| <b>Змістовий модуль 2</b>                                                                                                                     |                 |              |           |          |           |
| <b>ТЕМА 8.</b> Вимоги до робочих лопаток і особливості їх проектування Напруги розтягнення від відцентрових сил в довільному перерізі лопатки | 8               | 1            | 2         | -        | 5         |
| <b>ТЕМА 9.</b> Напруження згину в довільній точці профілю лопатки                                                                             | 9               | 1            | 2         | -        | 6         |
| <b>ТЕМА 10.</b> Температурні напруги в лопатках турбін. Оцінка запасів міцності робочих лопаток компресора і турбіни                          | 6               | 2            | -         | -        | 4         |
| <b>ТЕМА 11.</b> Допущення при розрахунку дисків на міцність, мета розрахунку. Граничні умови                                                  | 8               | 1            | 3         | -        | 4         |
| <b>ТЕМА 12.</b> Рівняння радіального рівноваги елемента диска. Складання рівняння спільності деформацій.                                      | 8               | 2            | -         | -        | 6         |
| <b>ТЕМА 13.</b> Температурні напруги в дисках. Методи оцінки запасів міцності дисків                                                          | 8               | 2            | 2         | -        | 4         |
| <b>ТЕМА 14.</b> Камери згоряння ГТД. Вихідні пристрої ГТД                                                                                     | 12              | 2            | 4         | -        | 6         |
| <b>Модульний контроль</b>                                                                                                                     | 1               | 1            | -         | -        | -         |
| <b>Разом за змістовим модулем 2</b>                                                                                                           | <b>60</b>       | <b>12</b>    | <b>13</b> | <b>-</b> | <b>35</b> |
| <b>Усього годин</b>                                                                                                                           | <b>120</b>      | <b>24</b>    | <b>24</b> | <b>-</b> | <b>72</b> |

### 5. Теми практичних занять

| № з/п        | Назва теми                                                      | Кількість годин |
|--------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1            | Знайомство з конструкціями ГТД та ДВЗ (ауд. 103, 107, фойє м.к) | 3               |
| 2            | Компресори ГТД                                                  | 2               |
| 3            | Турбіни ГТД                                                     | 3               |
| 4            | Трансмисії ГТД                                                  | 3               |
| 5            | Камери згоряння ГТД                                             | 2               |
| 6            | Вихідні пристрої ГТД                                            | 3               |
| 7            | Розрахунок статичної міцності лопатки компресора                | 4               |
| 8            | Розрахунок статичної міцності диска компресора                  | 4               |
| <b>Разом</b> |                                                                 | <b>24</b>       |

### 6. Самостійна робота

| № з/п        | Назва теми                                                                                                                     | Кількість годин |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1            | Вступ. Історія виникнення теплових двигунів. Авіаційні силові установки                                                        | 5               |
| 2            | Загальні питання компонування ГТД                                                                                              | 4               |
| 3            | Характеристика силових схем роторів                                                                                            | 6               |
| 4            | Характеристика силових схем корпусів                                                                                           | 6               |
| 5            | Компресори газотурбінних двигунів                                                                                              | 6               |
| 6            | Турбіни газотурбінних двигунів                                                                                                 | 4               |
| 7            | Визначення осьових зусиль та крутних моментів, що діють на конструкції ГТД                                                     | 6               |
| 8            | Вимоги до робочих лопаток і особливості їх проектування Напруги розтягнення від відцентрових сил в довільному перерізі лопатки | 5               |
| 9            | Напруження згину в довільній точці профілю лопатки                                                                             | 6               |
| 10           | Температурні напруги в лопатках турбін. Оцінка запасів міцності робочих лопаток компресора і турбіни                           | 4               |
| 11           | Допущення при розрахунку дисків на міцність, мета розрахунку. Граничні умови                                                   | 4               |
| 12           | Рівняння радіального рівноваги елемента диска. Складання рівняння спільності деформацій                                        | 6               |
| 13           | Температурні напруги в дисках. Методи оцінки запасів міцності дисків                                                           | 4               |
| 14           | Камери згоряння ГТД. Вихідні пристрої ГТД                                                                                      | 6               |
| <b>Разом</b> |                                                                                                                                | <b>72</b>       |

### 7. Методи навчання

Вивчення теоретичного матеріалу по курсу «Конструкція теплових двигунів та енергетичних установок», виконання практичних робіт щодо схем, та конструкцій двигунів та силових установок з тепловими двигунами.

#### *Контрольні питання для самостійної роботи*

#### *Модуль 1*

#### *Змістовий модуль 1*

1.1. Класифікація зусиль, що діють в ВМД, за походженням і за напрямком. Визначення осьового зусилля, що діє на елементи конструкції двигуна.

- 1.2. Осьова газодинамічна сила на лопатках робочого колеса компресора. Повне осьове зусилля на робочому колесі ступені компресора.
- 1.3. Осьова газодинамічна сила на лопатках направляючого апарату ступені компрес-сміття. Повний осьове зусилля на напрямному апарату ступені компресора.
- 1.4. Осьова газодинамічна сила на лопатках робочого колеса турбіни. Повне осьове зусилля на робочому колесі ступені турбіни.
- 1.5. Осьова газодинамічна сила на лопатках соплового апарату ступені турбіни. Повне осьове зусилля на сопловому апараті ступені турбіни.
- 1.6. Визначення осьового зусилля, що діє на елементи конструкції двигуна. Підсумовування осьових зусиль на роторах компресора і турбіни. Підсумовування осьових зусиль на корпусах компресора і турбіни.
- 1.7. Моменти кручення від газових сил на лопатках робочого колеса компресора і на лопатках направляючого апарату компресора.
- 1.8. Моменти кручення від газових сил на лопатках робочого колеса турбіни і на лопатках соплового апарату турбіни.
- 1.9. Визначення крутного моменту, що діє на елементи конструкції двигуна. Підсумовування крутних моментів, що діють на ротор двигуна і на його корпус.
- 1.10. Загальні питання компонування ГТД. Вибір конструктивно-компонувальної схеми.
- 1.11. Визначення силової схеми ГТД. Основні вимоги. Склад силових схем ротора і корпусу.
- 1.12. Загальна характеристика силових схем роторів. Класифікація роторів за кількістю опор. З'єднання валів багато-опорних роторів.
- 1.13. Корпус ГТД з зовнішнім і внутрішнім корпусами КС, пов'язаними між собою в зоні СА 1-ої ступені турбіни і перед КС.
- 1.14. Корпус ГТД з зовнішнім і внутрішнім корпусами КС, не пов'язаними між собою в зоні СА 1-ої ступені турбіни.
- 1.15. Корпус ГТД з одним несучим (зовнішнім) контуром корпусу КС.
- 1.16. Компресори газотурбінних двигунів. Ступені компресора. Робочий процес в ступені компресора
- 1.17. Конструкції лопаток компресора. Зазори. Матеріали виготовлення
- 1.18. Турбіни газотурбінних двигунів. Ступені турбіни. Робочий процес в ступені
- 1.19. Конструкції лопаток турбіни. Зазори. Матеріали виготовлення

## *Модуль 2*

### *Змістовий модуль 2*

- 2.1. Вимоги до робочих лопаток і особливості їх проектування. Сили, що діють на робочу лопатку. Розрахункові режими для оцінки міцності лопаток.
- 2.2. Напруги розтягнення від відцентрових сил в довільному перерізі лопатки. Осереднений закон зміни площ поперечного перерізу по довжині лопатки.
- 2.3. Вплив бандажної полиці на величину і розподіл напружень розтягу в пере лопатки.
- 2.4. Схема дії згинальних аеродинамічних сил на робочі лопатки компресора і турбіни. Визначення інтенсивності тиску аерогазодинамічних сил.
- 2.5. Визначення згинальних моментів від дії аерогазодинамічних сил. Розподіл згинальних моментів уздовж пера лопатки.
- 2.6. Напруження згину в довільній точці профілю лопатки. Найбільш навантажені від вигину точки профілю. Обґрунтування.
- 2.7. Схема визначення згинальних моментів в кореневому перерізі лопатки від дії відцентрових сил.
- 2.8. Компенсація вигину від аеродинамічних сил лопатки компресора відцентровими силами. Загальне правило компенсації згинальних моментів. Ступінь розвантаження колеса.
- 2.9. Температурні напруги в лопатках турбін. Розподіл термічних напружень по ширині лопатки при нерівномірному нагріванні.
- 2.10. Оцінка запасів міцності робочих лопаток компресора і турбіни

- 2.11. Основні вимоги до конструкції дисків. Умови роботи дисків ГТД і зусилля, що діють на диски.
- 2.12. Основні допущення при розрахунку дисків на міцність, мета розрахунку. Граничні умови в розрахунках дисків на міцність.
- 2.13. Рівняння радіального рівноваги елемента диска. Розрахункова схема.
- 2.14. Складання рівняння спільності деформацій. Розрахункова схема.
- 2.15. Вплив маточини на розподіл напружень в диску.
- 2.16. Розподіл температур по радіусу диска при різних режимах роботи ГТД. Температурні напруження в дисках. Приклади розподілу температурних напружень в дисках
- 2.17. Методи оцінки запасів міцності дисків. Розрахункові режими для визначення запасів міцності дисків.
- 2.18. Конструкції камер згоряння ГТД.
- 2.19. Конструкції вихідних пристроїв ГТД

## 8. Методи контролю

Поточний контроль здійснюється під час тестового модульного контролю та виконання розрахункової роботи, фінальний контроль – у вигляді заліку.

Критерії оцінювання:

- а) Опрацювання матеріалу лекції оцінюється в 0,5 бали;
  - б) Виконана практична робота оцінюється максимум в 6 балів;
  - с) Виконання завдання тесту модульного контролю оцінюється максимум в 23 балів.
- Модульний контроль являє собою тест з 23 питань. Правильна відповідь на кожне з них оцінюється в 1 бал;
- д) Підсумковий тест (залік) являє собою письмову відповідь на два теоретичних питання з екзаменаційного білета по курсу лекцій. Час підготовки: дві години.

Формою підсумкового контролю є залік.

## 9. Розподіл балів, які отримують студенти

| Складові навчальної роботи | Бали за одне заняття (завдання) | Кількість занять (завдань) | Сумарна кількість балів |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Модуль 1</b>            |                                 |                            |                         |
| Робота на лекціях          | 0...0,5                         | 6                          | 0...3                   |
| Виконання практичних робіт | 4...6                           | 4                          | 15...24                 |
| Модульний контроль         | 0...23                          | 1                          | 15...23                 |
| <b>Модуль 2</b>            |                                 |                            |                         |
| Робота на лекціях          | 0...0,5                         | 6                          | 0...3                   |
| Виконання практичних робіт | 4...6                           | 4                          | 15...24                 |
| Модульний контроль         | 0...23                          | 1                          | 15...23                 |
| Сума                       |                                 |                            | 60...100                |

## Шкала оцінювання: національна та ECTS

| Сума балів за всі види навчальної діяльності | Оцінка ECTS | Оцінка за національною шкалою                      |                                                 |
|----------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                              |             | для екзамену, курсового проекту (роботи), практики | для заліку                                      |
| 90-100                                       | A           | відмінно                                           | зараховано                                      |
| 83-89                                        | B           | добре                                              |                                                 |
| 75-82                                        | C           |                                                    |                                                 |
| 68-74                                        | D           | задовільно                                         |                                                 |
| 60-67                                        | E           |                                                    |                                                 |
| 01-59                                        | FX          | незадовільно з можливістю повторного складання     | не зараховано з можливістю повторного складання |

## **11. Рекомендована література**

### **Базова**

1. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели, конструкция и расчет деталей / Г. С. Скубачевский. - М. : Машиностроение. – 1981.- 552 с.
2. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей : учебник ; под ред. Д. В. Хромина. - М. : Машиностроение. – 1989. - 368 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей : учебник для вузов ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. : Машиностроение. – 1984. - 384 с.

### **Допоміжна**

1. Никитин, Ю. М. Конструирование элементов деталей и узлов авиадвигателей / Ю. М. Никитин. - М. : Машиностроение. – 1968. – 324 с.
2. Пономарев, В. А. Настоящее и будущее авиационных двигателей / В. А. Пономарев. - М. : Воениздат. – 1982. - 240 с.

## **12. Інформаційні ресурси**

Електронні посібники по конструкціях двигунів, систем та агрегатів авіаційних силових установок