



## НАЗВА КУРСУ

# Проектування двигунів ракетно-космічних апаратів

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка
Освітня програма	Інженерія авіаційних та ракетно-космічних систем
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній
Обсяг дисципліни	165 год
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	В розкладі представлено згідно РНП лекції- 1, 5 год. і 2 год. лабораторні роботи кожного тижня рівномірно протягом семестру. <a href="http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ViewSchedule.aspx?v=792f255c-0559-495c-bedb-b1acd54332b3">http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ViewSchedule.aspx?v=792f255c-0559-495c-bedb-b1acd54332b3</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доцент ІАТ, к.т.н. Зінченко Д.М. +380632973370 Лабораторні: Кандидат технічних наук, доцент Білогуров Станіслав Олексійович, т.м. +380508864069, e-mail: steams@ukr.net
Розміщення курсу	<a href="#">Посилання на дистанційний ресурс</a>

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна «Проектування двигунів космічних апаратів» є важливим курсом для основ проектування ракетних систем, призначених для виведення корисного вантажу на задану орбіту, або точку космічного простору, дає розуміння можливих досягнень різного типу двигунів та області їх застосування. Вивчення курсу дисципліни дозволяє розуміти шляхи підвищення основних характеристик рідинних ракетних двигунів (РРД) та методи проектування основних вузлів і агрегатів.

Метою дисципліни є вивчення основ теорії рідинних ракетних двигунів (РРД) з метою опанування методів розрахунку основних параметрів та характеристик двигунів, принципів побудови камери згоряння і сопел, вибору принципової схеми РРД, вивчення процесів у камері РРД та способів її надійного охолодження. Засвоєння дисципліни забезпечує одержання компетентностей згідно із освітньою програмою:

ЗК 3. Здатність до проведення досліджень для розв'язання складних задач у професійній (науково-технічній) діяльності.

ЗК 10. Здатність до самостійного освоєння нових методів дослідження, зміни наукового й науково-виробничого профілю своєї діяльності.

ФК 4. Здатність описувати моделі робочих процесів у системах та елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки, необхідні для розуміння, опису, вдосконалення об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки та оптимізації їх параметрів

ФК 5. Здатність ставити та вирішити професійні задачі на основі базових знань у галузі гідравлічних, пневматичних, електричних та електронних систем.

ФК 10. Здатність проектувати та використовувати сучасні системи авіаційних і космічних об'єктів.

ФК 11. Здатність оптимізувати газодинамічні параметри літальних апаратів та ракетних двигунів.

Предметом дисципліни є теорії проектних розрахунків камер рідинних ракетних двигунів, газогенераторів, сопел розширення газів процесів сумішоутворення і теплообміну.

В результаті навчання здобувачі одержують методики розрахунку проектних параметрів РРД, практичні навички застосування отриманих знань для обґрунтованого вибору раціональних пневмогідравлічних схем двигуна, надати уявлення про задачі, які постають перед розробниками РРД на етапі проектування та можливі шляхи їх розв'язання. Це забезпечує наступні програмні результати згідно із освітньою програмою:

ПРН 1. 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

ПРН 9. Вміння обґрунтовано призначати клас матеріалів для елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки.

ПРН 15. Вміння організовувати виконання складних завдань у професійній діяльності шляхом послідовного та якісного виконання їхніх окремих етапів, в тому числі з залученням колективу виконавців

ПРН 17. Вміння використовувати на практиці сучасні методи, способи та засоби проектування, виробництва, ремонту, складання, випробування та (або) сертифікації елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки для різних типів промислового виробництва

ПРН 19. Вміння, на основі знань та розуміння особливостей конструкції та робочих процесів в системах та елементах авіаційної та ракетно-космічної техніки формулювати та розв'язати науково-технічні задачі щодо розроблення їх новітніх зразків.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

**знати:**

- класифікацію рідинних ракетних двигунів;
- конструктивні схеми рідинних ракетних двигунів;
- методи розрахунку проектних параметрів РРД;
- методи газодинамічного профілювання профілю камери;
- методи розрахунку і побудови характеристик камери;
- особливості процесів у камері двигуна;
- способи організації надійного охолодження камери двигуна;

**вміти:**

- пояснити переваги й недоліки існуючих схем РРД;
- провести термогазодинамічний розрахунок камери;
- розрахувати і побудувати газодинамічний профіль камери;
- побудувати характеристики камери;
- спроектувати сумішеву головку камери;
- розрахувати теплообмін у камері двигуна;
- обрати раціональну схему охолодження камери.

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Курс базується на таких дисциплінах як «Вища математика», «Фізика», «Хімія», «Нарисна геометрія», «Креслення», «Термодинаміка». Набуті знання при вивченні курсу використовуються при курсовому та дипломному проектуванні та у професійній практиці.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

Теоретичний курс дисципліни складає 36 академічних годин і містить наступні теми:

### **Тема 1. Загальні відомості про ракетні двигуни.**

#### **Розділ 1. Теорія тяги рідинних ракетних двигунів.**

Тема 1.1. Визначення тяги як рівнодіючої сил тиску.

Тема 1.2. Виведення формули тяги з рівняння імпульсів та аналіз її.

Тема 1.3. Основні характеристики двигуна. Іпит та ін..

Тема 1.4. Основні складові тяги та місце їх прикладання.

Тема 1.5. Вплив стрибка ущільнення в соплі на тягу та питомий імпульс.

#### **Розділ 2. Термогазодинамічний розрахунок камери.**

Тема 2.1. Склад палива, ентальпія та ентропія продуктів згоряння.

Тема 2.2. Термогазодинамічний розрахунок реального двигуна.

#### **Розділ 3. Сопла камер.**

Тема 3.1. Типи сопел і основні вимоги до них.

Тема 3.2. Принципи побудови профільованого сопла.

Тема 3.3. Робота і характеристики сопел з центральним тілом.

Тема 3.4. Характеристики РРД. Висотна та дросельна.

#### **Розділ 4. Процеси в камері згоряння рідинного ракетного двигуна.**

Тема 4.1. Особливості процесу згорання палива в РРД.

Тема 4.2. Струминна форсунка.

Тема 4.3. Відцентрова форсунка. Коефіцієнт витрати.

Тема 4.4. Типи форсуночних головок.

#### **Розділ 5. Теплообмін у камері РРД.**

Тема 5.1. Променевий та конвективний теплообмін.

Тема 5.2. Організація зовнішнього та внутрішнього охолодження.

Тема 5.3. Вплив різних факторів на температуру стінки й охолоджувальної рідини.

## **4. Навчальні матеріали та ресурси**

Базова література:

### **Основна:**

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1968., 395 с.
2. Махин В.А. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Дом техники, 1961, 598 с.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. /А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, А.В. Кузнецов и др./ Под ред. В.М. Кудрявцева. -4-е изд., перераб. и доп.-М.: Высш. шк., 1993 – 368 с.
4. Махин В.А. Жидкостные ракетные двигатели. Теория и проектные расчеты камер. Издание второе, переработанное и дополненное. Днепр. АРТ-ПРЕСС, 2020, 560 с.
5. Ракетные двигатели. Т.М.Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков и др./ Под ред. Т.М.Мелькумова. М. Машиностроение, 1968, 511 с.

### **Методичне забезпечення:**

1. Горбенко Г.А. Основи теорії та розрахунку рідинних ракетних двигунів. Навчальний посібник, РВВ ДНУ, 2001, 68 с.
2. Горбенко Г.А. Охолодження камери теплового двигуна. Навчальний посібник, РВВ ДНУ, 2000, 54 с.
3. Сичевой А.В., Морозов Ю.Д. и др. Практикум по курсу «Теория и проектирование тепловых двигателей. Методич. пособие, ДГУ, 1989, 84 с.

### **Додаткова:**

1. Алемасов В.Е. и др. Теория жидкостных ракетных двигателей./ Под ред. В.П. Глушко.-М.: Машиностроение, 1989 – 464 с.
2. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник / Под ред. В.П. Глушко. М.: Машиностроение, 1971., 506 с.

### **1. Інформаційні ресурси**

1. Бібліотека ФТФ
2. Бібліотека ДНУ
3. Електронні посібники

Обов'язковими для прочитання є розділи з наведеної базової, що тематично відповідають лекційному матеріалу. Факультативними з базової літератури є джерела 5. З додаткової літератури факультативним є джерела 2.

## **Навчальний контент**

### **5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)**

Дисципліна розрахована на один семестр. Аудиторне навантаження складається з лекцій – 36 ак. год. і лабораторних робіт - 36 ак. год. Аудиторні заняття рівномірно розподілені протягом семестру, що дозволяє здобувачам вищої освіти планомірно організовувати і планувати свою роботу.

Теоретична частина складається з 5 логічно пов'язаних тематичних розділів: 1 – Теорія тяги рідинних ракетних двигунів (теми 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5); 2 – Термогазодинамічний розрахунок камери (теми 2.1, 2.2); 3 - Сопла камер (теми 3.1, 3.2, 3.3, 3.4); 4 – Процеси в камері згорання рідинного ракетного двигуна (теми 4.1, 4.2, 4.3, 4.4); 5 - Теплообмін у камері РРД (теми 5.1, 5.2, 5.3). Для підготовки до 1 розділу рекомендовано спиратися на джерела 1, 2 з числа базової літератури і джерела 1 з числа додаткової літератури та 1 методичної. Для підготовки до 2 розділу рекомендовано спиратися на джерела 1, 4 з числа базової літератури і джерела 1, 2 з числа додаткової літератури та 3 методичної. Для підготовки до 3 розділу рекомендовано спиратися на джерела 1, 4, 5 з числа базової літератури і джерела 1 з числа додаткової літератури та 1 методичної. Для підготовки до 4 розділу рекомендовано спиратися на джерела 1, 2, 3, 4 з числа базової літератури і джерела 1, 3 з числа методичної літератури.

Метою лекцій з дисципліни «Проектування двигунів космічних апаратів» є набуття основ теоретичних знань для проектування і конструювання ракетних двигунів (РРД) з метою опанування методів розрахунку основних параметрів та характеристик двигунів, принципів побудови камери згорання і сопел, вибору принципової пневмогідрравлічної схеми РРД, вивчення процесів у камері РРД та способів її надійного охолодження. Це вимагає від здобувачів вищої освіти вивчення попереднього досвіду проектування двигунів та творчого підходу до його вдосконалення.

Лекція 1: Загальні відомості про ракетні двигуни. (Тема 1)

Лекція 2: Виведення формули тяги з рівняння імпульсів та аналіз її. (Тема 1.2)

Лекція 3: Основні характеристики двигуна. Іпит та ін.. (Тема 1.3)

Лекція 4: Вплив стрибка ущільнення в соплі на тягу та питомий імпульс. (Тема 1.5)

Лекція 5: Типи сопел і основні вимоги до них. (Тема 3.1)

Лекція 6: Принципи побудови профільованого сопла. (Тема 3.2)

Лекція 7: Робота і характеристики сопел з центральним тілом. (Тема 3.3)

Лекція 8: Характеристики РРД. Висотна та дросельна. (Тема 3.4)

Лекція 9, 10: Особливості процесу згорання палива в РРД. (Тема 4.1)

Лекція 11, 12: Струминна форсунка. Відцентрова форсунка. Коефіцієнт витрати. (Тема 4.2-4.3)

Лекція 13, 14: Типи форсуночних головок. (Тема 4.4)

Лекція 15, 16: Організація зовнішнього та внутрішнього охолодження. (Тема 5.2)

Лекція 17, 18: Вплив різних факторів на температуру стінки й охолоджувальної рідини. (Тема 5.3)

Лабораторні роботи виконуються з використанням основної і довідникової літератури і орієнтовані на самостійне мислення. Кожна робота проводиться протягом 6 ак. год., що обумовлено необхідністю вирішення основних задач в процесі проектування окремих вузлів двигуна. Виконанню лабораторної роботи передують теоретична підготовка і допуск викладачем кожного здобувача вищої освіти до роботи після проходження вхідного контролю знань. Тематика лабораторних робіт:

Лабораторна робота 1. Пневмогідравлічні схеми двигунів

Лабораторна робота 2. Конструктивні особливості форсунок та їх розташування на головці камери

Лабораторна робота 3. Особливості конструкції і розрахунку об'єму камери

Лабораторна робота 4. Особливості компоновки двигуна та ракети в цілому

Лабораторна робота 5. Керування вектором тяги

Лабораторна робота 6. Запуск двигуна і вплив на його міцність

Для підготовки до виконання лабораторних робіт використовуються додаткова і основна література, експлуатаційна документація на обладнання, джерело 1, 4 з числа базової літератури і джерело 3 з числа додаткової літератури, а також 1 з методичного забезпечення.

Календарний план організації навчального процесу представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

№ тижня	№ лекції	№ лабораторної роботи
1	Лекція 1	
2	Лекція 2	
3	Лекція 3	
4	Лекція 4	Лабораторна робота 1
5	Лекція 5	
6	Лекція 6	Лабораторна робота 2
7	Лекція 7	
8	Лекція 8	Лабораторна робота 3
9	Лекція 9	
10	Лекція 10	Лабораторна робота 4
11	Лекція 11	
12	Лекція 12	Лабораторна робота 5
13	Лекція 13	
14	Лекція 14	Лабораторна робота 6
15	Лекція 15	
16	Лекція 16	
17	Лекція 17	
18	Лекція 18	

## 6. Самостійна робота студента/аспіранта

Обсяг самостійної роботи протягом семестру складає 57 ак. год. Структура самостійної роботи наступна.

На самостійне опрацювання виносяться наступні теми:

Тема 1.1. Визначення тяги як рівнодіючої сил тиску. (4 ак. год.).

Тема 1.4. Основні складові тяги та місце їх прикладання. (2 ак. год.).

Тема 2.1. Склад палива, ентальпія та ентропія продуктів згоряння. (4 ак. год.).

Тема 2.2. Термогазодинамічний розрахунок реального двигуна. (6 ак. год.).

Тема 5.1. Променевий та конвективний теплообмін. (8 ак. год.).

Протягом вивчення дисципліни студенти виконують Контрольну Роботу з визначення температури охолоджувальної рідини у двигуні літального апарата з простою конфігурацією і розміром в заданому температурному діапазоні (3 ак. год.).

Підготовка до аудиторних занять (12 ак. год.).

Проведення розрахунків та пошук інформації для виконання лабораторних робіт (6 ак. год.).

Протягом семестру студенти виконують курсовий проект (45 ак. год.) та захищають його.

Підготовка до екзамену (12 ак. год.)

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Відвідування лекцій і лабораторних робіт є обов'язковим і здійснюється за затвердженим розкладом або згідно з індивідуальним планом здобувача вищої освіти. В разі пропущення з поважних причин лекцій студент опрацьовує її електронний варіант і викладає основні положення у короткому рефераті. Відпрацювання пропущених лабораторних робіт проводиться наприкінці семестру за окремим затвердженим графіком.

На аудиторних заняттях мобільні телефони мають бути відключені. Складні моменти тем, що виносяться на лекції можуть доручатися здобувачам вищої освіти для підготовки коротких доповідей або дискусійних питань до обговорень з метою збільшення активності слухачів.

Лабораторні роботи захищаються під час виконання чергової лабораторної роботи у вигляді звітів з відповіддю на контрольні запитання. Пропущені лабораторні роботи проводяться і захищаються за окремим графіком в кінці семестру.

Контрольна робота видається на початку семестру індивідуально кожному окремо і захищається у вигляді письмово виконаної роботи, що містить розрахунки і необхідний графічний матеріал (рисунок, графіки тощо) індивідуально за окремим графіком.

Використовують наступні правила заохочувальних і штрафних балів.

За активну участь в обговоренні складних тем +1...4 балів.

За не допуск до лабораторного практикуму у зв'язку з незадовільним вхідним контролем за повторним відпрацюванням знімається 1 бал, за відсутність на лабораторному практикумі без поважних причин знімається 2 бали, відсутність на занятті без поважної причини: -1...-4 бал.

В разі визначення плагіату при виконанні контрольної роботи, або не самостійного виконання лабораторної роботи їх результати анулюються.

### 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, що він отримує за наступне:

- виконання і відповіді на лабораторних роботах;
- виконання контрольної роботи;
- виконання курсової роботи;
- відповіді на екзамені.

Система рейтингових (вагових) балів та критерії оцінювання

1. Лабораторні роботи

Ваговий бал – 4.

Максимальна кількість балів дорівнює 4 балів x 6 = 24 балів.

Критерії оцінювання:

повне виконання роботи – 4;

за не допуск до лабораторного практикуму у зв'язку з незадовільним вхідним контролем при відпрацюванні знімається 1 бал.

за відсутність на лабораторному практикумі без поважних причин знімається 2 бали при повторному відпрацюванні.

## 2. Контрольна робота

Ваговий бал – 10.

Максимальна кількість балів дорівнює 10 балів  $\times 1 = 10$  балів.

Критерії оцінювання:

повне виконання завдання – 10;

неповне виконання завдання – 5...8;

незадовільне виконання – 0.

Штрафні та заохочувальні бали:

творчий підхід до роботи, активна участь в обговоренні тем, самостійний пошук тем: +1...6 балів;

відсутність на занятті без поважної причини: –1...–6 бал.

Максимальна кількість заохочувальних та штрафних балів дорівнює 6.

Розрахунок шкали (R) рейтингу:

Сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$R_c = 24 + 10 + 6 = 40 \text{ балів.}$$

Необхідною умовою допуску до екзамену є виконання усіх лабораторних робіт та контрольної роботи.

## 3. Курсовий проект

Згідно таблиці відповідності рейтингових балів, з урахуванням вірного виконання, своєчасно, володінням матеріалу курсової роботи і вдалого захисту.

## 3. Екзамен

Екзаменаційна складова шкали дорівнює 60 % від  $R_c$ , а саме 60 балів, і складається з теоретичної частини що містить три питання з різних тем.

За кожне питання за умови вільного володіння матеріалом, відповіді на усі додаткові питання – 20 балів;

досить впевнене володіння матеріалом, неповні відповіді на додаткові питання – 15 балів;

непевнена відповідь на основне питання, не має відповіді на додаткові питання – 10 балів;

не має відповіді на основне питання – 0 балів.

Таким чином, рейтингова шкала з дисципліни складає

$$R = R_c + R_e = 40 + 60 = 100 \text{ балів.}$$

Умови позитивної проміжної атестації у семестрі.

Для отримання "зараховано" з першої проміжної атестації (8 тиждень) студент матиме не менш, ніж 12 балів ( за умови, якщо на початок 8 тижня згідно з календарним планом контрольних заходів "ідеальний" студент має отримати 20 балів).

Для отримання "зараховано" з другої проміжної атестації (14 тиждень) студент матиме не менш, ніж 24 бали ( за умови, якщо на початок 14 тижня згідно з календарним планом контрольних заходів "ідеальний" студент має отримати 40 балів).

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль.

1. Класифікація реактивних двигунів і основні їх характеристики
2. Пневмогідролічна схема РРД с насосною системою подачі і принцип її дії
3. Пневмогідролічна схема РРД з витискнутою системою подачі і принцип її дії
4. Визначення тяги як рівнодіючої сил тиску
5. Виведення формули тяги з рівняння імпульсів і аналіз її
6. Тяга та питомий імпульс для двигунів з допалюванням та без допалювання генераторного газу

7. Основні складові тяги та місце їх прикладання. Коефіцієнт тяги
8. Вплив стрибка ущільнення в соплі на тягу та питомий імпульс
9. Що включає термогазодинамічний розрахунок камери
10. Розрахунок теоретичних параметрів газу та реального двигуна за I-S - діаграмою
11. Вплив температури, тиску та коефіцієнта надлишку окислювача на основні параметри
12. Типи сопел та вимоги до них
13. Принцип побудови профільованого сопла. Оптимальні сопла
14. Робота і характеристики сопел з центральним тілом
15. Висотна характеристика двигуна
16. Дросельна характеристика двигуна
17. Особливості протікання процесів у камері при згорянні палива
18. Струминна форсунка і її характеристик розпилу
19. Відцентрова форсунка і її характеристик розпилу
20. Змішання компонентів палива і форсуночні головки
21. Випаровування палива на номінальному режимі і спалахування його в момент запуску двигуна
22. Променевий теплообмін у двигуні
23. Особливості теплообміну в камері РРД. Зовнішнє охолодження
24. Тепловіддача від стінки камери до рідини. Умови надійного охолодження
25. Вплив різних факторів на температуру стінки камери згорання та охолоджувальну рідину
26. Шляхи інтенсифікації охолодження
27. Внутрішнє охолодження
28. Теплозахист стінки термостійким покриттям

Дисципліна «Проектування двигунів космічних апаратів» відноситься до сучасних дисциплін, яка знаходиться на етапі постійного вдосконалення. Цей етап характеризується різноманітністю підходів і можливістю активного творчого ставлення розробників впливати на подальший розвиток дисципліни. Такі умови передбачають використання сучасних наукових статей, дисертацій, монографій і інших сучасних джерел інформації для опанування вище наведеної дисципліни, а не тільки запропонованої літератури.

#### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** доцентом кафедри двигунобудування, к.т.н., доцентом Білогуровим Станіславом Олексійовичем.

**Ухвалено** кафедрою авіа та ракетобудування (протокол № 11 від 17.06.20)

**Погоджено** Методичною комісією ІАТ (протокол № 2 від 22.06.20)