

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

Кафедра конструкцій і проектування ракетної техніки (№ 401)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник проектної групи

 В.О. Серeda
(підпис) (ініціали та прізвище)

«_____» _____ 2021 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА ВИБІРКОВОЇ
НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Теорія ракетних двигунів
(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: Ракетні двигуни та енергетичні установки
(найменування освітньої програми)

Форма навчання: денна

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Харків 2021 рік

Робоча програма Теорія ракетних двигунів

(назва дисципліни)

для студентів за спеціальністю 134 Авіаційні та ракетно-космічні комплекси
освітньою програмою Ракетні двигуни та енергетичні установки

« 26 » 08 2021 р., – 12 с.

Розробник: Завістовський Д.І. доцент каф. 401, канд. техн. наук

(прізвище та ініціали, посада, науковий ступінь і вчене звання)



(підпис)

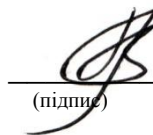
Робочу програму розглянуто на засіданні кафедри конструкцій і проектування
ракетної техніки

(назва кафедри)

Протокол № 1 від « 27 » 08 2021 р.

В.о. завідувача кафедри канд. техн. наук

(науковий ступінь і вчене звання)



(підпис)

В.О. Середа

(ініціали та прізвище)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показника	Галузь знань, спеціальність, освітня програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни (денна форма навчання)	
Кількість кредитів 12	Галузь знань <u>13 Механічна інженерія</u> (шифр і найменування) Спеціальність <u>134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка</u> (код і найменування) Освітня програма <u>«Ракетні двигуни та енергетичні установки»</u> (найменування) Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)	За вибором	
Модулів – 2		Рік підготовки: 2021/2022	
Змістових модулів –			
Індивідуальне науково-дослідне завдання: РР		Семестр 5	Семестр 6
Загальна кількість годин – 360			
Годин для денної форми навчання: аудиторних – 160 самостійної роботи студента – 200		Лекції * 64 год.	Лекції * 32 год.
		Практичні * 16 год.	Практичні * 16 год.
		Лабораторні 32 год.	Лабораторні год.
		Самостійна робота 143 год.	Самостійна робота 57 год.
		Індивідуальні завдання: 0 год.	Індивідуальні завдання: 0 год.
	Вид контролю: іспит	Вид контролю: іспит	

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить 160*/200*

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

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Програма навчальної дисципліни складається з таких основних тем:

1. Основні поняття і параметри, що характеризують ракетні двигуни.
2. Термодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна.
3. Газодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна.
4. Термодинамічний цикл РРД. ККД ракетного двигуна. Режими роботи ракетного двигуна. Характеристики РРД.
5. Процеси в камері РРД. Термодинамічний розрахунок камери РРД.
6. Сопла ракетних двигунів.
7. Теплообмін в рідинних ракетних двигунах.
8. Практичний розрахунок камери РРД.

Мета навчання – вивчення студентами теоретичних знань про робочий процес в камерах ракетних двигунів.

Завдання – навчити студентів розуміти суть робочого процесу в камерах ракетних двигунів, виконувати всі необхідні розрахунки для подальшого проектування камер РРД.

Результати навчання. У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен *знати*:

- основні поняття і параметри, що характеризують ракетні двигуни;
- особливості робочого процесу в камері ракетного двигуна;
- що таке термодинамічний цикл РРД;
- види ККД ракетного двигуна;
- особливості роботи ракетного двигуна на різних режимах;
- про витратну і висотну характеристики РРД;
- види передпалювальних процесів в камері РРД;
- різновиди сопел ракетних двигунів;
- особливості теплообміну в камері РРД.

вміти:

- виконувати розрахунки камери РРД, а саме:
- термохімічний розрахунок палива;
- термодинамічний розрахунок камери;
- розрахунок геометричного профілю камери;
- розрахунок форсунок;
- розрахунок охолодження камери.

мати навички:

- обробки результатів експериментів, що проводяться в рамках лабораторного практикуму;
- формулювання висновків на основі отриманих результатів.

Міждисциплінарні зв'язки. при вивченні дисципліни студент повинен мати підготовку в області технічних дисциплін, термодинаміки, гідрогазодинаміки, фізичної хімії.

3. Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. (5 семестр)

Модуль 1.

ТЕМА 1. Основні поняття, що характеризують ракетні двигуни.

Ракетний двигун. Основне призначення. Класифікація.

ТЕМА 2. Основні параметри, що характеризують ракетний двигун.

Тяга ракетного двигуна, виведення формули тяги. Питомий імпульс, витратний і тяговий комплекси ракетного двигуна.

ТЕМА 3. Термодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна.

Внутрішня теплова енергія газу. Перший закон термодинаміки. Ентальпія газу. Теплоємність газу. Показник адіабати. Хімічна енергія палива. Повна ентальпія. Термодинамічні процеси в газах. Змінення параметрів стану газу при політропічних процесах. Робота, що здійснюється при термодинамічних процесах. Перетворювання енергії у політропічних процесах. Другий закон термодинаміки. Ентропія. Оборотно́ість у термодинамічних процесах. Дисоціація продуктів згоряння. Оборотно́ість хімічних реакцій. Хімічна рівновага газової суміші. Константа рівноваги хімічної реакції. Рівноважне і нерівноважне розширення продуктів згоряння.

Модуль 2.

ТЕМА 4. Газодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна.

Рівняння зберігання маси. Рівняння зберігання енергії. Швидкість звуку в газі. Виведення формули для обчислювання швидкості звуку. Швидкість звуку в реагуючому газі. Швидкість звуку в газі, що рухається. Залежність швидкості звуку від температури. Максимальна швидкість газу. Критична швидкість газу. Число М. Поняття про стрибки ущільнення. Форма

надзвукового сопла. Критичний перепад тиску. Зв'язок між розмірами критичного перетину і параметрами газу на вході в сопло. Змінення параметрів газового потоку по довжині сопла.

ТЕМА 5. Термодинамічний цикл РРД.

Ідеальний цикл. Робота циклу. Зв'язок між роботою циклу і питомим імпульсом РРД. Теоретичний цикл. Дійсний цикл.

ТЕМА 6. ККД ракетного двигуна. Режими роботи ракетного двигуна.

Енергетична та імпульсна системи ККД. Різні види ККД. Термічний ККД ідеального циклу. Нерозрахункові режими роботи ракетного двигуна.

ТЕМА 7. Характеристики РРД.

Витратна характеристика РРД. Висотна характеристика РД.

Змістовий модуль 2. (6 семестр)

Модуль 1

ТЕМА 8. Процеси в камері РРД.

Передпалювальні процеси в РРД. Розпилення палива. Теорія і розрахунок відцентрових однокомпонентних форсунок. Випаровування палива. Запалювання палива.

ТЕМА 9. Термодинамічний розрахунок камери РРД.

Складання системи рівнянь для визначення складу продуктів згоряння при заданій температурі. Складання системи рівнянь для визначення складу і температури продуктів згоряння. Рівняння реакцій дисоціації та балансу елементів. Вид системи рівнянь для визначення складу і температури продуктів згоряння. Методи розв'язання системи рівнянь для визначення складу і температури продуктів згоряння. Визначення складу і температури продуктів згоряння на зрізі сопла.

Модуль 2

ТЕМА 10. Сопла ракетних двигунів.

Види сопел та основні вимоги до них. Оцінка і види втрат в соплі ракетного двигуна. Втрати на розсіювання швидкості на виході з сопла. Втрати на тертя в соплі. Втрати на вході в сопло. Проектування конічних сопел. Загальні положення при побудованні профільованого сопла. Ско-рочені і оптимальні сопла. Приблизний метод побудування контуру оптимального сопла.

ТЕМА 11. Теплообмін в рідинних ракетних двигунах.

Способи теплового захисту камер РРД. Теплообмін в РРД при зовнішньому охолодженні. Залежність температури газової стінки від швидкості руху охолоджувача. Вплив поверхневого кипіння охолоджуючої рідини на величину температури газової стінки. Залежність температури газової стінки від теплопровідності матеріалу стінки камери РРД. Залежність температури газової стінки від товщини стінки камери РРД. Вплив тиску і температури в камері на значення температури газової стінки і сумарного теплового потоку. Вплив розмірів та форми охолоджуючого тракту на температуру газової стінки. Вплив режиму роботи двигуна на температуру газової стінки.

Практичний розрахунок камери РРД.

1. Розрахунок палива по складу компонентів, визначення основних параметрів.
2. Термодинамічний (тепловий) розрахунок камери РРД.
3. Розрахунок витрат паливних компонентів та визначення критичного і вихідного перетинів сопла.
4. Побудова газодинамічного профілю камери.
5. Розрахунок однокомпонентних рідинних відцентрових форсунок.
6. Розрахунок проточного охолодження камери РРД.
7. Визначення термодинамічних параметрів камери використовуючи довідник Термодинамічних і теплофізичних властивостей продуктів згоряння.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усь- го	у тому числі				
		лекц	лаб	прак	інд	с.р.
Змістовний модуль 1.						
Модуль 1.						
Тема 1. <i>Ракетний двигун. Основне призначення. Класифікація.</i>	7	2				5
Тема 2. <i>Основні параметри, що характеризують ракетний двигун.</i>	13	3				10
Тема 3. <i>Тяга, питомий імпульс, витратний і тяговий комплекси ракетного двигуна.</i>	7	2				5
Тема 4. <i>Термодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна. Внутрішня теплова енергія газу. Перший закон термодинаміки.</i>	17	3	4			10
Тема 5. <i>Ентальпія газу. Теплоємність газу. Показник адіабати.</i>	7	2				5
Тема 6. <i>Хімічна енергія палива. Повна ентальпія.</i>	7	2				5
Тема 7. <i>Термодинамічні процеси в газах. Змінення параметрів стану газу при політропічних процесах.</i>	9	2		2		5
Тема 8. <i>Робота, що здійснюється при термодинамічних процесах. Перетворювання енергії у політропічних процесах.</i>	17	6	4	2		5
Тема 9. <i>Другий закон термодинаміки. Ентропія.</i>	9	4				5
Тема 10. <i>Оборотність у термодинамічних процесах. Дисоціація продуктів згоряння. Оборотноість хімічних реакцій.</i>	14	3	4	2		5
Тема 11. <i>Хімічна рівновага газової суміші. Рівноважне і нерівноважне розширення продуктів згоряння.</i>	19	3	4	2		10
Разом за змістовим модулем 2	126	32	16	8		70
Модуль 2						
Тема 12. <i>Газодинамічні основи робочого процесу в камері ракетного двигуна. Рівняння зберігання маси. Рівняння зберігання енергії.</i>	8	3				5
Тема 13. <i>Швидкість звуку в газі.</i>	13	3				10
Тема 14. <i>Залежність швидкості звуку від температури. Максимальна швидкість газу. Критична швидкість газу. Число М.</i>	12	3	4			5

Тема 15. <i>Поняття про стрибки уці- льнення.</i>	12	2				10
Тема 16. <i>Форма надзвукового сопла.</i>	7	2				5
Тема 17. <i>Критичний перепад тиску.</i>	11	2	4			5
Тема 18. <i>Зв'язок між розмірами кри- тичного перетину і параметрами газу на вході в сопло. Змінення параметрів газового потоку по довжині сопла.</i>	7	2				5
Тема 19. <i>Термодинамічний цикл РРД.</i>	11	2		4		5
Тема 20. <i>Робота циклу. Зв'язок між роботою циклу і питомим імпульсом РРД.</i>	11	2	4			5
Тема 21. <i>Енергетична та імпульсна системи ККД. Різні види ККД.</i>	7	2				5
Тема 22. <i>Термічний ККД ідеального циклу.</i>	8	3				5
Тема 23. <i>Нерозрахункові режими ро- боти ракетного двигуна.</i>	11	2	4			5
Тема 24. <i>Характеристики РРД.</i>	11	4		4		3
Разом за модулем 2	129	32	16	8		73
Усього за 5 семестр	255	64	32	16		143
Змістовий модуль 2. (Семестр 6)						
Модуль 1						
Тема 25. <i>Передпалювальні процеси в РРД. Розпилення палива.</i>	6	3				3
Тема 26. <i>Теорія і розрахунок відцен- трових однокомпонентних форсунок.</i>	8	4				4
Тема 27. <i>Випаровування палива. За- палювання палива.</i>	6	3				3
Тема 28. <i>Термодинамічний розраху- нок камери РРД. Складання системи рівнянь для визначення складу продук- тів згоряння.</i>	6	3				3
Тема 29. <i>Рівняння реакцій дисоціації та балансу елементів.</i>	6	3				3
Тема 30. <i>Методи розв'язання систе- ми рівнянь для визначення складу і те- мператури продуктів згоряння.</i>	5	2				3
Тема 31. <i>Визначення складу і темпе- ратури продуктів згоряння на зрізі соп- ла.</i>	3	2				1
Разом за модулем 1	40	20				20
Модуль 2.						
Тема 32. <i>Сопла ракетних двигунів. Види сопел та основні вимоги до них.</i>	3	1				2
Тема 33. <i>Оцінка і види втрат в соплі ракетного двигуна.</i>	4	1				3

Тема 34. <i>Проектування конічних сопел.</i>	3	1				2
Тема 35. <i>Загальні положення при побудованні профільованого сопла.</i>	4	1				3
Тема 36. <i>Скорочені і оптимальні сопла.</i>	3	1				2
Тема 37. <i>Приблизний метод побудування контуру оптимального сопла.</i>	4	1				3
Тема 38. <i>Способи теплового захисту камер РРД.</i>	4	1				3
Тема 39. <i>Теплообмін в РРД при зовнішньому охолодженні.</i>	3	1				2
Тема 40. <i>Залежність температури газової стінки від швидкості руху охолоджувача. Вплив поверхневого кипіння охолоджуючої рідини на величину температури газової стінки.</i>	4	1				3
Тема 41. <i>Залежність температури газової стінки від теплопровідності матеріалу стінки камери РРД. Залежність температури газової стінки від товщини стінки камери РРД.</i>	3	1				2
Тема 42. <i>Вплив тиску і температури в камері на значення температури газової стінки і сумарного теплового потоку.</i>	3	1				2
Тема 43. <i>Вплив розмірів та форми охолоджуючого тракту на температуру газової стінки. Вплив режиму роботи двигуна на температуру газової стінки.</i>	4	1				3
Тема 44. <i>Практичний розрахунок камери РРД.</i>	23			16		7
Разом за модулем 2	65	12		16		37
Разом за змістовим модулем 2	105	32		16		57
РАЗОМ З ДИСЦИПЛІНИ	360	96	32	32		200

5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кільк. год.
1	Розрахунок палива по складу компонентів, визначення основних параметрів.	2
2	Термодинамічний (тепловий) розрахунок камери РРД.	6
3	Розрахунок витрат паливних компонентів та визначення критичного і вихідного перетинів сопла.	6
4	Побудова газодинамічного профілю камери.	6

5	Розрахунок однокомпонентних рідинних відцентрових форсунок.	4
6	Розрахунок проточного охолодження камери РРД.	4
7	Визначення термодинамічних параметрів камери використовуючи до- відник	2
8	Визначення термодинамічних і теплофізичних властивостей продуктів згоряння.	2
	Разом	32

7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Експериментальне визначення гідравлічних параметрів форсунок РРД.	8
2	Дослідження процесу розпику рідини відцентровою форсункою.	8
3	Зняття характеристик головки камери згоряння РРД.	8
4	Зняття витратної характеристики камери згоряння РРД.	8
	Разом	32

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Особливості принципу дії твердопаливних ракетних двигунів.	30
2	Сумарний імпульс та питома маса ракетного двигуна.	30
3	Підрахунок кількісного значення ентропії.	10
4	Вплив температури і тиску на склад продуктів згоряння.	10
5	Виникнення нерозрахункових режимів при зміні висоти роботи ракетного двигуна.	20
6	Виникнення нерозрахункових режимів при регулюванні тяги.	30
7	Змінення термічного ККД двигуна з постійним соплом при зміні ступеня можливого розширення.	40
8	Регулювання сопла ракетного двигуна.	10
9	Виконання розрахунків по РР згідно індивідуальних початкових да- них.	20
	Разом	200

9. Індивідуальні завдання

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
	Разом	

10. Методи навчання

Проведення аудиторних лекцій, практичних занять, індивідуальні консультації (при необ-
хідності), самостійна робота студентів за матеріалами, опублікованими кафедрою (методичні
посібники).

11. Методи контролю

Проведення поточного контролю, письмового модульного контролю, фінальний контроль

у вигляді іспитів. Виконання розрахункової роботи «Розрахунок камери РРД».

12. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

Семестр 5

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Модуль 1			
1. Робота на лекціях	0..0,5	16	0..8
2. Виконання та захист лабораторних робіт	3..4	2	6..8
3. Виконання та захист практичних робіт	1...2	4	4..8
4. Складання модульного контролю	20..26	1	20..26
Модуль 2			
1. Робота на лекціях	0..0,5	16	0..8
2. Виконання та захист лабораторних робіт	3..4	2	6..8
3. Виконання та захист практичних робіт	1...2	4	4..8
4. Складання модульного контролю	20..26	1	20..26
Всього за семестр			60...100

Семестр 6

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)	Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів
Модуль 1			
1. Робота на лекціях	0..1	8	0..8
2. Виконання та захист практичних робіт	1...2	4	4..8
3. Виконання розрахунково-практичної роботи	10..14	1	10..14
4. Складання модульного контролю	16..20	1	16..20
Модуль 2			
1. Робота на лекціях	0..1	8	0..8
2. Виконання та захист практичних робіт	1...2	4	4..8
3. Виконання та захист розрахунково-практичної роботи	10..14	1	10..14
4. Складання модульного контролю	16..20	1	16..20
Всього за семестр			60...100

Семестровий контроль (іспит/залік) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту/заліку. Під час складання семестрового іспиту/заліку студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Білет для іспиту має тестовий вигляд. Складається з 25 теоретичних запитань. Максимальна кількість балів за кожне питання 4 бали (сума – 100 балів).

12.2. Якісні критерії оцінювання

Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки:

- основні поняття і параметри, що характеризують ракетні двигуни;
- особливості робочого процесу в камері ракетного двигуна;
- що таке термодинамічний цикл РРД;
- види ККД ракетного двигуна;
- особливості роботи ракетного двигуна на різних режимах;
- про витратну і висотну характеристики РРД;
- види передпалювальних процесів в камері РРД;
- різновиди сопел ракетних двигунів;
- особливості теплообміну в камері РРД.

Необхідний обсяг вмінь для одержання позитивної оцінки:

- виконувати розрахунки камери РРД, а саме:
 - термохімічний розрахунок палива;
 - термодинамічний розрахунок камери;
 - розрахунок геометричного профілю камери;
 - розрахунок форсунок;
 - розрахунок охолодження камери.

12.3 Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру

Задовільно (60-74). Мати мінімум знань та умінь. Відпрацювати всі практичні та лабораторні роботи. Вміти пояснити основні поняття: внутрішня теплова енергія газу; перший закон термодинаміки; ентальпія газу. Теплоємність газу. Показник адіабати. Хімічна енергія палива. Повна ентальпія.

Добре (75 - 89). Твердо знати мінімум знань, виконати усі передбачені програмою завдання. Володіти матеріалом на середньому рівні. Показати вміння виконувати всі практичні та лабораторні роботи в обумовлений викладачем строк з обґрунтуванням загальних рішень та заходів. Вміти пояснити процеси, які протікають у камері рідинного ракетного двигуна. Вміти виконати розрахунок геометричного профілю камери. Знати принцип розрахунку кількості форсунок та вміти розрахувати форсунки. Вміти виконати розрахунок охолодження камери.

Відмінно (90 - 100). Повністю володіти основним та додатковим матеріалом передбаченим програмою дисципліни. Знати усі теми. Орієнтуватися у підручниках та посібниках.

Вміти виконати та добре орієнтуватися в матеріалах стосовно розрахунку камери рідинного ракетного двигуна. Вміти пояснити отримані результати.

Здати всі контрольні точки вчасно та з оцінкою «відмінно».

Шкала оцінювання: бальна і традиційна

Сума балів	Оцінка за традиційною шкалою	
	Іспит, диференційований залік	Залік
90 – 100	Відмінно	Зараховано
75 – 89	Добре	
60 – 74	Задовільно	
0 – 59	Незадовільно	Не зараховано

13. Методичне забезпечення

Навчальні посібники:

1. Д. И. Завистовский, В. В. Спесивцев. Конструкция и проектирование агрегатов жидкостных ракетных двигателей. Камеры. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 122 с.
2. А. П. Моторненко, В. А. Шерышев. Определение энергетических и конструктивных параметров камер двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1987. – 72 с.

3. Руководство к лабораторным работам по курсу «Теория ЖРД» / Сост. И. П. Голдаев, А. П. Фурсов, А. С. Москаленко, А. П. Шевченко. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1973.

14. Рекомендована література

Базова

1. Г. Б. Синярев, М. В. Добровольский. Жидкостные ракетные двигатели. Теория и проектирование. – М.: Оборонгиз, 1957. – 580 с.
2. Основы теории и расчета ЖРД / Под ред. В. М. Кудрявцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 703 с.
3. М. В. Добровольский. Жидкостные ракетные двигатели. – Учебник. – М.: Машиностроение, 1968. – 396 с.
4. Алемасов В. Е. и др. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалін, А. П. Тишин; Под ред. В. П. Глушко. — М.: Машиностроение, 1989. — 464 с.

Допоміжна

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 5-ти томах / Под ред. В. П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1971.
2. Штехер М. С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей: Учебное пособие для авиационных вузов. — М.: Машиностроение, 1976. — 304 с.

15. Інформаційні ресурси

1. <http://www.yuzhnoye.com/>
2. <https://www.nasa.gov/>