

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

ЗАТВЕРДЖЕНО

Голова приймальної комісії

Національного аерокосмічного
університету ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Олександр ЛИТВИНОВ

_____ 2025 р.



**ПРОГРАМА
ВСТУПНОГО ВИПРОБУВАННЯ**

на навчання для здобуття ступеня доктора філософії
за освітньо-науковою програмою зі спеціальності

G11 – Машинобудування (за спеціалізаціями)

(шифр та найменування)

за освітньою програмою
Енергетичне машинобудування

(найменування)

у 2025 році

Харків
2025

Вступ

Вступне випробування для конкурсного відбору вступників до аспірантури для здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності *G11 – Машинобудування (за спеціалізаціями)* відбувається відповідно до «Правил прийому на навчання до Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» в 2025 році» у формі індивідуального письмового фахового іспиту, який приймає фахова екзаменаційна комісія з певної спеціальності (освітньої програми), склад якої затверджується наказом ректора Університету.

До іспиту входять питання за темами:

- Теорія двигунів та енергетичних установок
- Конструкція двигунів та енергетичних установок
- Системи та агрегати двигунів та енергетичних установок

Перелік питань за темами наведений у програмі.

Критерії оцінювання знань

1. Результат фахового іспиту визначається за шкалою від 100 до 200 балів.
2. Вступне випробування виконується у вигляді тестування. Результат фахового іспиту розраховується за формулою:

$$80+k*n,$$

де **k** – кількість балів за правильну відповідь на питання (дорівнює **4,8**),
n – кількість правильних відповідей (дорівнює **25**).

3. Якщо вступник отримав менше ніж 100 балів, то вважається що він не склав іспит і до участі в конкурсі не допускається.

Форма та порядок проведення вступного випробування

Іспит проводиться у формі комп'ютерного тестування, яке відбувається дистанційно у відповідності до положення про дистанційну форму здобуття вищої освіти в Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» від 24 вересня 2020 року засобами автоматизованої системи дистанційного навчання Mentor. До завдання включаються питання з різних тем та різного рівня складності, відібрані перед проведенням іспиту за випадковим принципом. Час, необхідний для виконання екзаменаційних завдань – 120 хвилин.

Виконавець перед проведенням іспиту повинен пред'явити документ, що посвідчує його особу, відключити засоби мобільного зв'язку.

1. ТЕОРІЯ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1. Теорія теплових двигунів та енергоустановок непрямого перетворення енергії

1.1.1. Термодинаміка

Термодинамічна система. Термодинамічний процес. Параметри стану. Рівняння стану ідеального газу. Перший закон термодинаміки. Вираз першого закону термодинаміки для закритої та відкритої термодинамічної системи. Перший закон термодинаміки для потоку. Другий закон термодинаміки. Основні формулювання. Теплові машини. Тепловий двигун. Тепловий насос. Холодильна машина. Цикл Карно. Термічний коефіцієнт корисної дії. Холодильний коефіцієнт. Опалювальний коефіцієнт. Багатофазні гомогенні та гетерогенні системи. Твердий, рідкий, газоподібний стан речовини. P-T діаграма фазових переходів. Крива насичення рідина-пар. Потрійна точка. Діаграма стану рідина-пар у P-I та T-S координатах. Вологість повітря. Цикли теплових машин. Повний коефіцієнт корисної дії. Цикл ГТУ (Брайтона). Цикл паросилової енергоустановки (Ренкіна). Цикл пароконденсійної холодильної машини.

1.1.2. Теплопередача

Види теплопереносу: теплопровідність, конвекція, теплообмін випромінювання. Основні рівняння: Фур'є, Ньютона, Стефана-Больцмана. Критерії подібності конвективного теплообміну. Критерії та числа подібності Рейнольдса, Грасгофа, Нуссельта. Теплопередача через стіну. Рівняння теплопередачі. Теплообмін при фазових перетвореннях. Рівняння тепловіддачі під час кипіння. Криве кипіння. Режими кипіння. Тепловіддача при конденсації пари. Плівкова та крапельна конденсація. Променевий теплообмін проміж тілами. Теплообмін Землі та супутників з космічним простором.

1.1.3. Системи забезпечення теплового режиму та теплообмінні апарати

Призначення системи забезпечення теплового режиму (СЗТР). Приклади ЗТР. Технічні вимоги, що висуваються до СЗТР. Структура СЗТР. Способи та засоби регулювання температурного режиму. Фізичне та математичне моделювання. Системний підхід при проектуванні СЗТР. Показники ефективності СЗТР. Кондуктивні підсистеми теплопереносу. Теплові мости. Теплоізолятори. Екранно-вакуумна теплоізоляція. Конвективні підсистеми переносу тепла. Контури теплопереносу з однофазним та двофазним теплоносієм. Термосифони. Гнучкі та контурні теплові труби. Замкнені насосні контури з двофазним теплоносієм. Математичне моделювання теплогідравлічних процесів в СЗТР. Основне рівняння теплового стану об'єкта. Моделювання розгалужених СЗТР. Типи теплообмінних апаратів: рекуперативні, регенеративні, змішувальні. Поверхні теплообміну: гладкі, ребристі. Рекуперативні теплообмінники: трубчасто-ребристі, кожухотрубні, пластинчасті. Схеми перебігу теплоносіїв: прямоток та протиток. Методи розрахунку. Термоплати – контактні теплообмінники для охолодження електроніки.

1.1.4. Теорія повітряно-реактивних двигунів (ПРД)

1.1.4.1. Силові установки з ПРД та їх параметри

Силова установка з ПРД та ГТУ, їх основні абсолютні параметри. Класифікація ГТД і області їх використання. Ефективна і внутрішня тяга силової установки. Зовнішній опір СУ. Еквівалентна потужність ГТД. Основні питомі параметри силових установок з ПРД. Схеми ГТД. Газогенераторна частина. Ступінь двоконтурності. Температура змішування потоків в ТРДД зі змішуванням потоків. Теплові діаграми ГТД. Ефективна та вільна роботи. Поняття приєднаної маси повітря гвинтом чи вентилятором. Ефект приєднаної маси ККД та енергетичний баланс силових установок з ПРД.

1.1.4.2. Характеристики елементів ПРД

Призначення, класифікація, основні параметри вхідних пристроїв і вимоги до них. Дозвукові вхідні пристрої. Надзвукові вхідні пристрої внутрішнього стиснення. Надзвукові вхідні пристрої

зовнішнього стиснення. Характеристики вхідних пристроїв. Помпаж і «зуд» надзвукових вхідних пристроїв зовнішнього стиснення. Регулювання надзвукових вхідних пристроїв. Характеристики компресора: загальний вигляд, розузгодження режимів роботи ступенів на нерозрахункових режимах роботи компресора, регулювання компресора. Пилозахисні пристрої. Призначення, класифікація і вимоги до камер згоряння. Основні параметри камер згоряння. Основні закономірності процесу горіння. Організація робочого процесу в основних камерах згоряння ПРД. Особливості організації робочого процесу в форсажних камерах. Експлуатаційні характеристики основних і форсажних камер згоряння. Вібраційне горіння палива і способи його попередження. Характеристики турбін: характеристики ступеня газової турбіни, особливості характеристик багатоступеневих турбін; регулювання турбін. Призначення, класифікація, основні параметри і вимоги до вихідних пристроїв. Сопла для докритичних і надкритичних перепадів тиску. Характеристики та регулювання вихідних пристроїв.

1.1.4.3. Термодинамічний аналіз циклу ПРД

Вираз корисної (ефективної) роботи циклу ТРД через параметри робочого процесу. Зв'язок ефективної і вільної роботи з питомою тягою двигуна. Залежність корисної роботи циклу, питомої тяги і питомих витрат палива від ступеня підігріву повітря. Залежність корисної роботи циклу, питомої тяги і питомих витрат палива від ступеня підвищення тиску. Оптимальний та економічний ступень підвищення тиску. Залежність корисної роботи циклу, питомої тяги і питомих витрат палива від ККД процесів стиснення і розширення. Залежності питомої потужності і питомих витрат палива ТВаД і ТГД від параметрів робочого процесу. Оптимальний розподіл роботи циклу ТГД між гвинтом і реакцією. Ціль та способи форсування ГТД. Теплова діаграма ТРДФ. Залежності питомої тяги і питомих витрат палива ТРДФ від параметрів робочого процесу. Вибір параметрів циклу у проектуванні ТРД і ТРДФ. Параметри робочого процесу та питомі параметри ТРДД. Робота циклу ТРДД без змішування потоків і її оптимальний розподіл між контурами. Призначення, схеми, організація робочого процесу і характеристики камер змішування ТРДД. Оптимальний розподіл роботи циклу між контурами ТРДД і ТРДДФ зі змішуванням потоків. Вплив параметрів робочого процесу на питомі параметри ТРДД і ТРДДФ.

1.1.4.4. Програми керування та спільна робота елементів силової та газотурбінної установок

Система рівнянь, що описують спільну роботу елементів одновального ТРД. Задачі керування (регулювання) ТРД і ТРДФ і поняття про програми (закони) керування (регулювання) двигуна. Спільна робота компресора, камери згоряння і турбіни одновального ТРД і ТРДФ. Спільна робота турбіни і реактивного сопла одновального ТРД і ТРДФ. Коефіцієнти стійкості та запасу стійкої роботи компресору. ЛСР при умові $\pi_T^* = \text{const}$ (однопараметричні програми керування). ЛСР при програмі керування $T_T^* = \text{const}$ і $n = \text{const}$ (двопараметрична програма керування). Особливості спільної роботи газових турбін і сопла двовальних ТРД і ТРДФ. Особливості спільної роботи компресора, камери згоряння і турбіни двовальних ТРД і ТРДФ. Спільна робота надзвукового вхідного пристрою і компресора. Особливості керування і спільної роботи елементів ТРДД без змішування потоків. Особливості керування і спільної роботи елементів ТРДД зі змішуванням потоків. Особливості керування (регулювання) ТРДДФ. Особливості керування (регулювання) і спільної роботи елементів ТГД. Особливості керування (регулювання) і спільної роботи елементів ТВаД.

1.1.4.5. Характеристики силових установок з ПРД

Номенклатура основних режимів роботи ПРД, характеристики силових установок з ПРД та методи їх одержання. Швидкісні характеристики силових установок з ТРД, ТРДФ. Особливості швидкісних характеристик силових установок з ТРДД і ТРДДФ. Швидкісні характеристики силових установок з ПРД. Модель стандартної атмосфери. Висотні характеристики силових установок з ГТД. Вплив числа Рейнольдса на висотні характеристики. Обмеження на висотно-швидкісних характеристиках ТРД. Діапазон висот та швидкостей ЛА і області обмежень режимів роботи силової установки. Дросельні характеристики силових установок з ТРД і ТРДФ. Вплив програм керування (регулювання) на дросельні характеристики ТРД і ТРДФ. Особливості

дросельних характеристик силових установок з ТРДД і ТРДДФ. Дросельні характеристики силових установок з ТГД і ТВаД. Подібність режимів роботи ГТД. Приведення результатів випробувань ПРД до стандартних атмосферних умов. Вплив атмосферних умов на основні данні ПРД. Кліматичні характеристики ГТД.

1.1.4.6. Несталі режими роботи ПРД

Умови спільної роботи елементів ПРД в несталіх процесах. Прийнятність і скид газу ТРД. Включення і виключення форсованого режиму. Запуск ТРД. Особливості перехідних процесів двовальних ТРД і ТРДД. Особливості перехідних процесів ТВаД і ТГД.

1.1.4.7. Екологічні аспекти ПРД

Вплив двигунів на навколишнє середовище. Шум авіаційних двигунів. Головні фізичні поняття і норми на припустимий рівень шуму. Зовнішні і внутрішні джерела шуму у двигунах. Засоби зниження шуму двигунів. Токсичність продуктів згорання.

1.1.4.8. Інтеграція літака з силовою установкою

Літакові силові установки з ПРД, ефективні характеристики і маса. Проблеми комплексного вибору параметрів літака та його силової установки. Вибір головних параметрів для проектування двигуна. Формування газоповітряного тракту ГТД. Методи узгодження компресорів і турбін ГТД.

1.1.5. Теорія ракетних двигунів (РД)

1.1.5.1. Загальні питання

Типи ракетних двигунів (РД). Класифікація РД. Ракетні двигуни на хімічних паливах: РРД, РДТП, ГРД. Області застосування різних типів РД.

Рівняння тяги РД. Головні складові тяги камери, місце їхнього прикладання. ККД РД (термічний, тяговий, загальний). Характеристичні параметри РД: і питомий імпульс, характеристична швидкість, коефіцієнт тяги сопла, питома маса. Оцінка втрат у камері РД. Намір тяги і питомого імпульсу камери РД.

Течії в соплах РД. Загальні відомості про устрій та оцінку досконалості сопел. Режими недорозширення та перерозширення. Тяга камери при відриві потоку від стінок сопла. Аналіз та оцінка втрат у соплах. Методи профілювання сопел.

Висотна і дросельна характеристики РД.

Головні відомості щодо рідких, твердих та гібридних ракетних палив та їх фізико-хімічні характеристики. Енергетичні характеристики палив.

Термодинамічний розрахунок процесів у РД. Розрахунок термохімічних властивостей палив. Розрахунок згорання і витікання газів. Особливості термодинамічних розрахунків при наявності конденсованої фази. Вплив коефіцієнту надлишку окислювача, тиску у камері згорання, ступеня розширення та інших чинників на питомий імпульс.

Процеси горіння, запалення і загасання. Механізми горіння у РРД. Горіння твердих ракетних палив (ТРП).

Основи теорії теплообміну в РД.

1.1.5.2. Рідинно-ракетні двигуни

Теоретичні основи вибору схеми та параметрів РРД. Витіснювальні схеми РРД, галузі застосування. Турбонасосні схеми без допалювання та з допалюванням, галузі застосування.

Процеси у камері згорання та їх розрахунок. Головні вимоги до організації процесів сумішоутворення. Теорія і розрахунок струминних і відцентрових рідинних форсунок. Турбулентне перемішування газів при їхньому прямуванні до камери згорання. Вибір і визначення головних параметрів камери згорання. Особливості процесів у газогенераторах. Особливості і схеми теплозахисту стінок камери РРД. Охолоджувальні властивості компонентів палив. Фізичні основи і методи розрахунку охолодження.

1.1.5.3. Ракетні двигуни твердого палива

Особливості робочого процесу в РДТП. Швидкість горіння ТРП як головний

розрахунковий параметр. Головні відомості щодо фізико-хімічних законів горіння балістичних та сумішних ТРП. Залежність швидкості горіння ТРП від тиску та початкової температури. Поняття про стаціонарну і нестаціонарну швидкості горіння ТРП. Горіння ТРП в умовах обдуву поверхні, що горить, газовим потоком. Типи зарядів ТРП та їх розрахунок. Щільність заряджання камери згоряння, головні обмеження.

Основи газодинамічного розрахунку РДТП. Диференціальні рівняння руху продуктів згоряння. Розрахунок течій газів при різноманітних формах зарядів ТРП. Процес запалення головного заряду ТРП. Вибір типу та маси заряду запального пристрою.

Відхилення параметрів РДТП від номінального розміру і засоби зменшення розкиду балістичних параметрів.

Регулювання тяги РДТП, передстартове та в умовах польоту. Види пристроїв для зміни напрямку вектора тяги та їх порівняльні оцінки. Засоби відсічки тяги. РДТП з багатократним вмиканням.

1.1.6. Теорія енергетичних установок непрямого перетворення енергії

1.1.6.1. Енергетичні установки з паротурбогенераторами

Паротурбогенератори і особливості їх робочого процесу. Працездатність ступеня турбіни. Схеми паротурбінних ЕУ. Вибір робочого тіла. Розрахунок параметрів. Обмеження за кавітацією і урахування переохолодження. Ув'язка параметрів турбінного контуру з теплообмінним контуром ЕУ.

Характеристики паротурбінної установки. Особливості запуску в бортових умовах. Енергомасові характеристики і ККД установки. Конструкція паротурбінної ЕУ і її елементів.

Особливості використання паротурбінних ЕУ у складі ядерних, сонячних та інших систем електроживлення для бортових ЕУ.

1.1.6.2. Енергоустановки з газотурбогенераторами

Робочий процес ступеня газової турбіни і компресора. Основні термодинамічні співвідношення. Осьові і радіальні турбомашини. Профілювання проточної частини і трикутники швидкостей.

Схеми газотурбінних ЕУ з сонячними, ядерними, радіоізотопними джерелами тепла. Вплив параметрів робочого процесу на властиві параметри установки; Оптимізація параметрів.

Узгодження спільної роботи газотурбокомпресора, його характеристики. Умови забезпечення надійності установки. Енергомасові характеристики і ККД установки. Конструкція газотурбінної ЕУ і її елементів.

Модульні схеми ядерних і сонячних ЕУ з газотурбогенераторами.

1.1.6.3. Парогазові енергетичні установки.

Робочі процеси. Основні термодинамічні співвідношення. Схеми.

1.2 Теорія електроракетних двигунів

1.2.1. Загальні питання

Основні програми космічних польотів із застосуванням ЕРД. Необхідні сумарні імпульси для виконання типових задач польоту.

Уява про механізми прискорення робочого тіла в ЕРД.

1.2.2. ЕРД з газодинамічним прискоренням робочого тіла

Електронагрівні двигуни. Схеми і особливості робочих процесів. Область застосування.

Плазмові двигуни з газодинамічним прискоренням робочого тіла. Схеми і принципи дії. Особливості робочих процесів, енергетичний баланс двигуна.

1.2.3. Двигуни з електростатичним прискоренням іонів

Процеси прискорення іонів електричним полем. Іонооптичні системи з електричним і магнітним фокусуванням струму часток. Методи розрахунку іонно-оптичних систем і параметрів струмів іонів. Нейтралізація іонного струму. Порожні катоди. Робочі процеси у порожнистих катодах.

Двигуни з замкнутим дрейфом електронів і продовженою зоною прискорення. Схеми і основи робочого процесу. Характеристики рушіїв.

Двигуни з замкнутим дрейфом електронів і анодним шаром. Характерні особливості процесів.

Іонні двигуни. Схеми і принципи дії поверхневих і просторових джерел іонів. Основні процеси у джерелах іонів та іонно-оптичній системі.

Енергетичний баланс двигунів. Розрахунок параметрів і характеристик двигунів.

Області застосування ЕРД з електростатичним прискоренням.

1.2.4. Двигуни з електромагнітним прискоренням плазми

Схеми і принципи дії плазмових двигунів з електромагнітним прискоренням плазми. Особливості робочих процесів в коаксіальних плазмових рушіях з власним магнітним полем. Розрахунок параметрів і характеристик коаксіальних ЕРД.

Торцеві великострумів двигуни. Схеми і особливості робочих процесів. Розрахунок параметрів і інтегральних характеристик.

Імпульсні плазмові двигуни з електромагнітним прискоренням, схеми і принципи дії. Моделі прискорення робочого тіла. Розрахунок параметрів і характеристик двигунів.

Області застосування різних типів ЕРД з електромагнітним прискоренням плазми.

1.2.5. Генератори і прискорювачі плазми

Технічні і технологічні особливості джерел плазми різноманітного призначення на базі ЕРД, щодо розрахунку генераторів плазми і прискорювачів різноманітного призначення. Розрахунок параметрів і характеристик генераторів і прискорювачів плазми різних схем. Оптимізація параметрів. Конструкція генераторів і прискорювачів.

1.3. Теорія енергетичних установок прямого перетворення енергії

1.3.1. Загальні питання

Поняття про енергетичну установку. Класифікація схеми і основні характеристики окремих частин енергоустановки. Системи прямого перетворення енергії в електричну: фотоелектричні, термоелектричні, термоемісійні, електрохімічні, термоелектрохімічні, магніто газодинамічні, тощо. Структурні схеми ЕУ.

Робочі тіла ЕУ Основні види робочих тіл, вимоги щодо робочих тіл.

1.3.2. Джерела енергії для ЕУ прямого перетворення

Можливі типи джерел енергії, особливості їх застосування в бортових ЕУ.

Сонячне випромінювання, його характеристики в навколосемному і міжпланетному просторі. Бортові приймачі енергії випромінювання. Концентратори сонячної енергії, основні види і їх характеристики.

Ядерні реактори бортових ЕУ. Основи ядерної фізики. Фізика ядерних реакторів. Основи нейтронно-фізичного і теплового розрахунку реактора. Керування реактором. Особливості тягових ядерних реакторів ядерних реакторних двигунів. Ядерно-лазерні ЕУ.

Радіоізотопні джерела енергії Види радіоізотопних палив. Характеристики радіоізотопних теплових блоків. Регулювання та особливості експлуатації.

Хімічні джерела енергії. Види і характеристики систем і робочих компонентів. Системи зберігання і подавання. Балонні, криогенні і зв'язані системи зберігання і їх характеристики.

1.3.3. Загальне проектування енергетичної установки

Загальні проблеми при проектуванні енергосилових (ЕСУ), енергетичних і рушійних установок. Системний аналіз ЕСУ. Компонувальні схеми установки з різними джерелами енергії, перетворювачами і двигунами. Вплив задачі польоту і типу КЛА на вибір схеми і рівень потужності ЕУ і тяги ЕРД.

1.3.4. Перетворювачі сонячної та теплової енергії в електричну

1.3.4.1. Фотоелектричні перетворювачі (ФП) та сонячні батареї (СБ) на їх основі

Особливості і області використання. Основні структурні схеми бортових ЕУ з СБ і хімічними

джерелами струму. Регулювання сонячних систем енергозабезпечення (СЕЗ).

1.3.4.2. Енергетичні установки з термоелектричними генераторами

Фізико-енергетичні основи термоелектрики. Основні процеси у термоелектричних перетворювачах і вплив рівня температури на вибір термоелектричних матеріалів.

Вибір параметрів ЕУ з термогенератором. Конструкція ЕУ з термоелектричними генераторами і їх елементів. Використання термоелектричних ЕУ з радіоізотопними і ядерними джерелами тепла.

1.3.4.3. Енергетичні установки з термоемісійними перетворювачами (ТЕП)

Особливості процесів на електродах. Режими роботи ТЕП. Електричні характеристики ТЕП. Вплив параметрів робочого процесу, конструкції і технології на ККД перетворювача.

Реактори-генератори з ТЕП. Вибір параметрів ЕУ з ТЕП. Конструкції установок і їх елементів.

1.3.4.4. Енергетичні установки з термоелектрохімічними перетворювачами (ТЕХП)

Процеси переносу іонів в твердих і загущених електролітах. Термодинаміка електрохімічного перетворення. Процеси на газодифузійних електродах. Схеми і характеристики ТЕХП. Ядерні, сонячні, радіоізотопні ЕУ з ТЕХП, особливості конструкції і технології.

1.3.4.5. Автономні енергоустановки наземного використання

Відновлювані і невідновлювані джерела енергії. Властивості та особливості сонячного випромінювання на поверхні Землі. Можливі споживачі електроенергії від наземних автономних ЕУ. Графіки енергоспоживання.

Приймачі сонячного випромінювання для наземних ЕУ, концентратори сонячної енергії. Безпосереднє використання сонячної теплової енергії. Теплові колектори і установки на їх основі.

Автономні ЕУ на основі ФП (ФЕУ). Принципові й конструкційні схеми. Особливості розрахунку і використання ФЕУ.

1.3.5. Електрохімічні генератори і накопичувачі енергії

1.3.5.1. Електрохімічні генератори

Елементи електрохімічної кінетики. Проходження струму крізь електроліт. Види поляризації: омична, активаційна і концентраційна. Термодинамічний, електричний і струмовий ККД генератора. Узгодження характеристик ЕХГ із споживачами енергії. Конструкція ЕУ з ЕХГ.

1.3.5.2. Електрохімічні акумулятори та батареї

Класифікація хімічних джерел струму (ХДС). Характеристики ХДС: ЕРС, напруга, внутрішній опір ХДС, тощо. Схеми заміщення ХДС. Аналітичний вираз зарядних і розрядних характеристик. Вплив температури на характеристики ХДС. Вплив тиску газів на характеристики герметичних акумуляторів. Енергія, потужність і коефіцієнти віддачі акумуляторів. Напрацювання, строк служби, строк придатності і збереженість АК і АБ. Методи заряду і розряду АК і АБ. Спільна робота АБ і СБ у бортових ЕУ. Регулювання АБ у бортовій системі електроживлення.

2. КОНСТРУКЦІЯ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

2.1. Повітряно-реактивні двигуни

2.1.1. Головні вузли, навантаження і силові системи ПРД

Головні вузли та силові системи ГТД. Умови роботи і навантаження на основні вузли та деталі двигуна. Газові сили і моменти, які діють на вузли ГТД. Засоби зменшення осьових сил, які діють на ротори двигунів. Конструкції опор роторів ГТД. Сили інерції, які діють на вузли ГТД. Статичне та динамічне балансування роторів. Силові системи роторів і статорів. Трансмисії ГТД, конструкція з'єднувальних муфт. Джерела температурних напружень у вузлах та деталях АД і ЕУ.

Компресори ГТД. Призначення, умови роботи та вимоги до компресорів АД та ЕУ. Класифікація компресорів ГТД, параметри, порівняльна оцінка. Осьові та відцентрові компресори. Конструктивні схеми осьових компресорів. Вимоги до конструкції компресора та шляхи їх

реалізації. Типи роторів осьових компресорів, їх порівняльна оцінка. Конструкція робочих лопаток компресора та вузлів їх кріплення. Навантаження, що діють на ротор компресора. Статори компресорів. Зазори між ротором і статором. Ущільнення проточної частини компресорів. Засоби забезпечення безпомпажної роботи компресора на всіх режимах роботи двигуна. Конструкційні матеріали осьових компресорів. Відцентрові компресори, їх недоліки та переваги. Класифікація відцентрових компресорів. Конструкція елементів відцентрових компресорів. Конструкційні матеріали для відцентрових компресорів.

Турбіни ГТД. Призначення, умови роботі та вимоги до турбін АД і ЕУ. Класифікація газових турбін. Параметри, які характеризують досконалість конструкції вузла турбіни. Робочі лопатки турбін, засоби їх сполучення з диском. Диски турбін, їх сполучення між собою та з валом. Розрахунок осьової сили, яка діє на ротор турбіни. Статори газових турбін. Соплові апарати, умови роботи, силові схеми та засоби кріплення до корпусів. Корпуси газових турбін. Охолодження деталей турбін. Визначення температури лопаток та дисків турбіни. Зазори проміж ротором і статором. Контактні та витратні ущільнення. Розрахунок витрати повітря скрізь лабіринтове ущільнення. Конструктивні матеріали для виготовлення деталей турбін.

Конструкція і проектування основних і форсажних камер згоряння ПРД. Призначення та особливості конструкції дифузорів, жарових труб та фронтних пристроїв. Стабілізація зони горіння. Охолодження елементів камер згоряння. Організація змішування продуктів згоряння із вторинним повітрям. Запуск камер згоряння, запальні пристрої. Головні навантаження на елементи камер згоряння. Конструкційні матеріали для елементів камер згоряння.

Вихідні та реверсивні пристрої. Вихідні пристрої ГТД, призначення, умови роботі, вимоги до вихідних пристроїв. Вихідні патрубки. Типи реактивних сопел. Регульовані та нерегульовані сопла. Сили, які діють на елементи реактивного сопла. Теплоізоляція та охолодження сопел. Реверсивні та девіаторні пристрої. Силова установка як джерело шуму та вібрації. Конструктивні методи зменшення рівня шуму. Проблема інфрачервоного випромінювання двигунів та засоби для її вирішення.

Особливості роботи та конструкції підшипників роторів ГТД. Конструкції опор підшипників. Газові та мастильні ущільнення. Підбір підшипників кочення, їх посадка у корпусі та на валі. Пружні та демпферні опори роторів. Розрахунок контактного та лабіринтового ущільнення. Мащення та охолодження підшипників. Розрахунки теплового стану підшипників.

2.1.2. Міцність головних деталей

Розрахунок на міцність ротора барабанного типу. Розрахунок вузла з'єднання ротора відцентрового компресора з валом. Розрахунок на міцність вала турбіни та фланцевого сполучення.

Розрахунок на міцність лопаток від дії відцентрових та газових сил. Розвантаження пера робочої лопатки від згинаючих моментів газових сил моментами від відцентрових сил. Особливості розрахунку лопаток з бандажними полицями, нерівномірно нагрітих лопаток.

Конструкція та розрахунок на міцність вузлів кріплення робочих лопаток компресорів та турбін.

Розрахунок на міцність дисків компресорів і турбін, виведення головних розрахункових рівнянь напруженого стану. Особливості розрахунку дисків зі стрибкоподібною зміною товщини та дисків відцентрових компресорів. Визначення запасу міцності диска за еквівалентними напруженнями та руйнуючої частоті обертання. Аналіз термонапруженого стану диска на прикладі диска постійної товщини.

Міцність оболонок. Виведення рівняння Лапласа для розрахунку на міцність тонкостінних оболонок. Розрахунки на міцність та жорсткість корпусів камер згоряння. Можливі несправності камер згоряння та конструктивні міри щодо забезпечення їх надійної роботи.

2.1.3. Коливання елементів

Коливання лопаток. Види та форми коливань. Вільні та вимушені коливання лопаток компресорів і турбін. Визначення частоти першої форми власних коливань моделі лопатки (плоскої пластини) за методом Релея. Вплив форми лопатки та умов її роботи на частоту вільних

коливань. Визначення частот кількох форм коливань реальної лопатки за методом скінчених елементів. Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на частоту власних коливань лопаток. Джерела змінних сил, що примушують лопатку коливатися. Визначення резонансних режимів. Побудова та аналіз частотної діаграми для робочої лопатки компресора або турбіни. Методи демпфування коливань лопаток. Автоколивання лопаток. Особливості коливань лопаток відцентрових компресорів. Динамічні напруження та запаси втомливої міцності лопаток.

Коливання дисків. Загальні поняття про коливання круглих пластин та дисків. Види і форми коливань дисків. Побудова та аналіз частотної діаграми для диска. Вплив конструкційних та експлуатаційних факторів на частоту власних коливань дисків. Критичні частоти обертання дисків. Міри боротьби з небезпечними коливаннями дисків компресорів та турбін.

Коливання тонкостінних оболонок камер згоряння. Види і форми коливань оболонок. Розрахунок власних частот коливань. Фактори, які впливають на частоти коливань тонкостінних оболонок.

Критична частота обертання невагомого вала з одним диском. Поняття "жорсткого" та "гнучкого" вала. Визначення частот власних поперечних коливань не обертового валу з одним диском. Поняття про види прецесії валів. Фактори що впливають на критичні оберти роторів. Вплив сил що розтягують або спирають вал. Вплив обертового моменту. Гіроскопічний момент та його вплив на критичні оберти. Визначення критичних обертів роторів з урахуванням гіроскопічного моменту. Визначення власних частот поперечних коливань валів, що несуть низку дисків (багатодискового ротору). Вимушені коливання обертових роторів, їх причини. Визначення критичних частот обертання ротора за допомогою частотної діаграми.

2.1.4. Редуктори та повітряні гвинти

Призначення та основні характеристики редукторів. Класифікація і кінематичні схеми редукторів. Конструкція редукторів. Розрахунки зубчастих передач та валів на міцність. Вимірювачі кружних моментів. Машення деталей редуктора.

Профілювання та характеристики повітряних гвинтів. Режими роботи гвинта. Сили та моменти, які діють на лопаті гвинтів. Призначення та основні характеристики гвинтів змінного кроку. Конструкція втулок прямої та зворотної дії. Механізація втулок ГЗК.

2.2. Ракетні двигуни

2.2.1. Рідинні реактивні двигуни

Конструкція і намір камери і газогенераторів РРД. Визначення головних розмірів камери і способи профілювання сопла. Силкові схеми камер і газогенераторів. Секційні камери. Конструктивні особливості вузла оболонок. Силкові і температурні навантаження. Схеми зв'язування оболонок. Конструктивні і технологічні особливості різноманітних схем зв'язування. Конструкція поясів зависи. Застосовувані матеріали. Конструкція голівки: силкові схеми, особливості проектування. Застосовувані матеріали. Намір на тривкість елементів камери і газогенератора. Аналіз навантажень. Методи розрахунку на міцність оболонок камер згоряння, що знаходяться за межею пружності.

2.2.2. Ракетні двигуни на твердому паливі

Класифікація, компоновальні схеми РДТП. Головні оцінки параметрів РДТП та вимоги щодо них. Конструкція РДТП із вкладним і скріпленням зарядом. Вибір робочого тиску в камері згоряння. Конструкція паливних зарядів ТРП і визначення головних параметрів. Засоби виготовлення заряду. Визначення напруг у заряді ТРП. Конструкція та проектування корпусів РДТП. Особливості конструкції корпусів РДТП зі склопластику. Методи розрахунку корпусу РДТП на тривкість і несучу спроможність. Конструкція соплових блоків. Визначення розмірів кінцевого й профілюваного сопла. Конструкція багатосоплових блоків керованих і некерованих ракет. Термоізоляція камери згоряння. Система запалення двигуна. Розрахунок навішування запальника. Конструкція пристроїв керування вектором тяги двигуна: поворотне та хитне сопло, дефлектори, насадки, висувні щитки, вдув газу, впорскування рідини. Вузли відсічки, обнулення та реверсу тяги.

2.3. Електрореактивні двигуни

Конструкційні схеми різних типів ЕРД. Аналіз типових вузлів двигунів і систем їх живлення робочим тілом, систем зберігання. Розрахунок на міцність елементів ЕРД. Температурні напруження, запаси міцності. Спрощення при розрахунках ЕРД на міцність. Центрування нагрітих деталей. Матеріали. Конструкція електродних вузлів, іонно-оптичних систем, газорозрядних камер, вузлів подачі робочого тіла та метало-керамічних вузлів. Поняття про довгі і короткі оболонки. Рівняння рівноваги циліндричної оболонки. Вільні та оперті оболонки. Сталий і змінний градієнт температури. Міцність іоно-оптичної системи, конічних оболонок, катодних та анодних вузлів. Елементи теплового захисту відведення тепла

2.4. Джерела і перетворювачі енергії

Особливості конструкції реакторів на теплових, швидких нейтронах, рідиннометалічному і газовому теплоносіях, теплових трубах. Конструкція електрогенеруючих каналів реакторів-генераторів.

Конструкція радіоізотопних теплових блоків. Температурні напруження в ТВЕЛах реакторів і радіоізотопних ампулах. Розрахунок міцності оболонок методом сумування ушкоджень.

Сонячні концентратори енергії, конструкційні схеми, системи розкриття, конструкції вузлів і деталей. Розрахунок на міцність плівкових концентраторів.

Конструкція сонячних батарей, фотоелектричних перетворювачів і їх систем. Каркасні і рулонні СБ. Механізми розкриття панелей і повороту СБ. Основні навантаження і розрахунки на міцність каркасних та стільникових панелей і систем розкриття. Термічні напруження в блоках ФП.

Конструкційні схеми електрохімічних генераторів, паливних елементів, батарей хімічних акумуляторів. Розрахунок на міцність корпусів, електродів, мембран, балонів системи зберігання компонентів і інших елементів ЕХГ, ХДС, АБ.

Машинні перетворювачі. Конструкційні схеми турбогенераторів. Гідростатичні і газостатичні підшипники. Розрахунок на міцність і коливання крилець турбін, дисків. Розрахунок критичної швидкості валів. Демпфування коливань.

Конструкційні схеми і конструкція термоемісійних перетворювачів. Розрахунок деформації катоду. Температурні напруження.

Теплообмінні апарати. Конструкційні схеми, конструкція теплообмінників, теплових труб, холодильників-випромінювачів. Міцність і стійкість трубок теплообмінних апаратів. Температурні напруження при запуску.

Агрегати ЕУ і ЕСУ. Конструкція насосів і регуляторів. Основні проблеми міцності, надійності агрегатів.

3. СИСТЕМИ ТА АГРЕГАТИ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Автоматичне керування ПРД. Структурні схеми та програми керування різних типів ПРД. Критерії якості САК ПРД. Багатоконтурні та багатовимірні САК, узгодження роботи контурів в багатоконтурних САК ПРД. ПРД як об'єкт керування. Моделювання динаміки САК ПРД та їх елементів.

Допоміжні системи ПРД: протипомпажна, паливостачання, мащення, суфлювання, охолодження, наддуву ущільнень, запуску, протиобморожування, пожежогасіння. Забезпечення висотності системи паливостачання.

Агрегати систем ПРД: баки, насоси, фільтри, теплообмінники, клапани, форсунки.

Динаміка та регулювання РРД. Взаємозв'язок процесів у двигуні і динамічні характеристики двигуна. Особливості процесів в елементах двигуна при запуску. Перехідні процеси при вимиканні.

Пневмогідросхеми різноманітних типів РРД. Запуск і вимикання РРД. Схемні і конструктивні засоби забезпечення надійного запуску та вимикання РРД.

Системи постачання компонентів. Витіснювальні системи постачання палива (НСПП). Конструкція та проектування ВСПП. Насосні системи постачання палива (НСПП). Елементи, що входять у НСПП. Класифікація і головні елементи в ТНА. Засоби запуску ТНА. Вузли ТНА. Конструкція та проектування турбін ТНА. Конструкція та проектування насосів ТНА. Редуктори ТНА, кінематичні схеми та елементи. Засоби охолодження деталей редукторів. Підшипники роторів ТНА. Критичні частоти обертання роторів*

Конструкція та проектування агрегатів автоматики та регулювання РРД. Схеми, конструкція, проектування паливних клапанів, регуляторів, пневмоклапанів, вентилів, редукторів і регуляторів сталості тиску.

ЛІТЕРАТУРА (ПРД та РД)

1. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка. – Київ : Техніка, 2001. – 320 с. [<https://www.twirpx.com/file/142336/>] (рос.) (укр.) – Переглянута : 9 вересня 2020 р.
2. Технічна термодинаміка : підруч. для студентів енерг. спец. : гриф МОН України / О. Ф. Буляндра. – 2-ге вид., випр. – К. – Техніка, 2006. – 320 с. [<http://www1.nas.gov.ua/publications/books/catalog/2006/Pages/326.aspx>] (рос.) (укр.) – Переглянута : 9 вересня 2020 р.
3. Теплотехніка : основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання тепла в сільському господарстві / Миронов О. С., Брижа М. Р., Бойко В. Б., Золотовська О. В. – Дніпропетровськ : ТОВ «ЕНЕМ», 2011. – 424 с. [<http://base.dnsgb.com.ua/files/book/teplotehnika.pdf>] (укр.) – Переглянута : 9 вересня 2020 р.
4. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. – 2-е видання, доп. та випр. – Х. : Світ Книг, 2014. – 495 с.
5. Врагов А. П. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв. – Суми : Вид-во СумДУ, 2005.
6. Системи забезпечення теплового режиму [Елект. ресурс]/ Г. А. Горбенко, П. Г. Гакал. – Навч. посібник. [<https://khaikaf205.wixsite.com/main/>].
7. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств. Ч.1 / за ред. Б. О. Левченко. – Харків : ХДПУ, 1999. – 420 с.
8. Теорія авіаційних газотурбінних двигунів / Л. Г. Бойко, Ю. М. Терещенко та ін. // Підручник. – К. : НАУ, 2013. 596 с.
9. Герасименко В.П. Теорія авіаційних двигунів. // Підручник. – Х. : ХАІ, 2003.
10. Теорія теплових двигунів. Підручник / Ю. М. Терещенко, Л. Г. Бойко, С. О. Дмитрієв та ін.; за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : Вища шк., 2001. – 382 с.
11. Терещенко Ю. М., Капітанчук К. І. Теорія авіаційних газотурбінних двигунів. – К. : КІ ВПС, 1997.
12. Єпіфанов, С. В. Конструкція авіаційних газотурбінних двигунів : Підручник / С. В. Єпіфанов, В. С. Чигрин. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. – 320 с.
13. Єпіфанов, С. В. Авіаційні паливні системи : Підручник / С. В. Єпіфанов, О. І. Риженко, Р. Ю. Цуканов. Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 544 с.
14. Yepifanov, S. Major units of aircraft gas turbine engines : Tutorial [Text] / S. Yepifanov, Y. Shoshin, Y. Gusev. – Kharkov. : National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, 2013. – 101 p.
15. Yepifanov, S. Afterburners and exhaust systems of turbine engines : Tutorial [Text] / S. Yepifanov, Y. Shoshin, V. Chygryn. Kharkov. : National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, 2014. – 32 p.
16. The Jet engine [Text] // The Technical Publications Department of RR plc. – Derby, England. – 1996. – 278 p.
17. Treager, I. E. Aircraft gas turbine engine technology [Text] / I. E. Treager. – 3-rd ed. – Glencoe/McGraw-Hill. 2001. – 677 p.
18. Hunecke, K. Jet engines. Fundamentals of theory, design and operation [Text] // K. Hunecke. – 6-th impression / Osceola : Motorbooks IP&W, 2003. – 241 p.

19. Boyce, M. P. Gas turbine engineering handbook [Text] / M. P. Boyce. – 3-rd ed. – Gulf Professional Publishing. – 2006. – 936 p.
20. Aerothermodynamics of gas turbine and rocket propulsion / Gordon C. Oates. – 3rd ed, 1997, 456 p. ISBN 1-56347-241-4
21. Gas turbine theory / H. Cohen, GFC. Rogers, H.H. Saravanamuttoo. – 4rd ed, 1996, 442 p ISBN 0-582-23632-0
22. Dynamics of combustion systems / A. K. Oppenheim. – 2nd ed, 2008, 368 p ISBN 978-3-540-77363-4
23. Elements of propulsion: gas turbines and rockets / Jack D. Mattingly. 2006, 849 p. ISBN 1-56347-779-3
24. Future spacecraft propulsion systems and integration / Paul A. Czysz, Claudio Bruno, Bernd Chudoba. – 3rd ed, 2018, 463 p. ISBN 978-3-662-54742-7
25. Fundamentals and technology of combustion / F. El-Mahallawy, S. El-Din Habik. 2002, 839 p. ISBN : 0-08-044106-8
26. Spacecraft power systems / Mukund R. Patel. 2004, 691 p. ISBN 0-8493-2786-5
27. Propellants and explosives : Thermochemical aspects of combustion / Naminosuke Kubota. 2002, 245 p. ISBN 3-527-30210-7 Hardback; 3-527-60050-7 Electronic
28. Rocket propulsion elements / G. P. Sutton, O. Biblarz. Ninth Edition. 2017 767 p. ISBN 9781118753651 (Hardcover) : ISBN 9781118753880 (ePDF) : ISBN 9781118753910 (ePub)
29. Rocket and spacecraft propulsion. Principles, practice and new developments / Martin J.L. Turner. Second edition. 2006. 313 p. ISBN 3-540-22190-5
30. Combustion processes in propulsion. Control, noise and pulse detonation / Edited by Gabriel D. Roy. 2006, 439 p. ISBN 13 : 978-0-12-369394-5; ISBN 10 : 0-12-369394-2
31. Simulating combustion. Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development / G. P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto. 2006, 401 p. ISBN 10 : 3-540-25161-8; ISBN 13 : 978-3-540-25161-3
32. Space Mission. Analysis and Design / Edited by Wiley J. Larson. Third Edition. 2005, 975 p. ISBN 1-881883-10-8 (pb) (acid-free paper) : ISBN 0-7923-5901-1 (hb) (acid-free paper)
33. Spacecraft systems engineering / P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. Fourth Edition. 2011, 679 p. ISBN 978-0-470-75012-4 (hardback)

ЛІТЕРАТУРА (ЕРД та ЕУ)

1. Mukund R. Patel Spacecraft Power Systems [Text] /CRC Press, 2004. – 736 p.
2. Енергобалансний розрахунок системи електрозабезпечення космічного апарата [Текст] : навч. посіб. / Ю. О. Шепетов; Нац. аерокосм. ун-т імені М. С. Жуковського "Харк. авіац. ін-т". – Харків : ХАІ, 2021. – 32 с.
3. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підруч. / [Клименко В. В., Солдатенко В. П., Плешков С. П., Скрипник О. В., Саченко А. І.]; за редакцією доктора технічних наук, професора Клименка В. В. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2023. – 268 с.
4. Dan M. Goebel Fundamentals of Electric Propulsion : Ion and Hall Thrusters [Text] /Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Press, 2008. – 486 p.

Гарант освітньо-наукової програми *Енергетичне машинобудування*





(підпис)

Сергій СПІФАНОВ

(ініціали та прізвище)


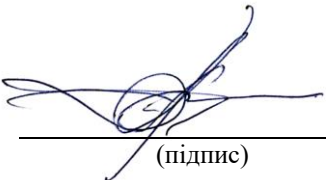
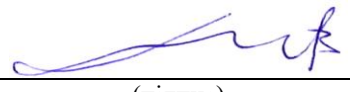
Програму розглянуто й узгоджено на сумісному засіданні кафедри конструкції авіаційних двигунів, теорії авіаційних двигунів, аерокосмічної теплотехніки, космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії

Протокол № 7 від « 11 » лютого 2025 р.

Завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів (203), д.т.н., професор <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Сергій ЄПІФАНОВ <hr/> (ініціали та прізвище)
Завідувач кафедри теорії авіаційних двигунів (201), к.т.н., доцент <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Олег КІСЛОВ <hr/> (ініціали та прізвище)
Професор кафедри аерокосмічної теплотехніки (205), д.т.н., доцент <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Павло ГАКАЛ <hr/> (ініціали та прізвище)
Завідувач кафедри космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії (402), к.т.н., доцент <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Юрій ШЕПЕТОВ <hr/> (ініціали та прізвище)

Програму вступного випробування для здобуття освітнього ступеня доктора філософії за освітньо-науковою програмою зі спеціальності *G11 – Машинобудування (за спеціалізаціями)* (освітня програма Енергетичне машинобудування)

Узгоджено

Голова фахової комісії д.т.н., професор <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Сергій ЄПІФАНОВ <hr/> (ініціали та прізвище)
Проректор з наукової роботи д.т.н., с.н.с. <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Володимир ПАВЛІКОВ <hr/> (ініціали та прізвище)
Завідувач відділу аспірантури і докторантури к. філос. н., доц. <hr/> (науковий ступень, посада)	 <hr/> (підпис)	Володимир СЕЛЕВКО <hr/> (ініціали та прізвище)