

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила
Канта»**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

для программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в
аспирантуре

Калининград

Лист согласования

Составитель: Румянцев А.В., к.ф.-м.н., профессор ОНК «Институт высоких технологий»

Рабочая программа утверждена на заседании
Ученого совета ОНК «Институт высоких технологий»

Протокол № 14 от «31» 01.2024 г.

Председатель Ученого совета
ОНК «Институт высоких технологий» Профессор, д.ф.-м.н.

Юров А.В.

Содержание:

О		
б		
щ	2. Объём дисциплины	4
а	3. Содержание дисциплины	5
я	4. Учебно-тематический план дисциплины	7
у		
обучающихся		
р	6. Оценочные средства для проведения текущего контроля успеваемости	8
и	промежуточной аттестации обучающихся	
н	7. Критерии оценивания результатов контрольно-оценочных	11
т	мероприятий текущей и промежуточной аттестации по дисциплине	
м	8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	11
и	9. Материально-техническое обеспечение дисциплины	12
с		
т		
о		
я		
т		
е		
л		
л		

1. Общая характеристика дисциплины

Учебная дисциплина «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» относится к числу дисциплин, направленных на подготовку и сдачу кандидатских экзаменов по научной специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Изучение учебной дисциплины «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» базируется на знаниях и умениях, полученных аспирантами ранее в ходе освоения программного материала других учебных дисциплин.

Цель изучения дисциплины: формирование знаний о плазме для описания процессов в разрядной камере электроракетного двигателя.

Задачи дисциплины: знание основных свойств плазмы и фундаментальных процессов, протекающих в ней как во внешних полях, так и без них; проблем и методов ускорения частиц плазмы; классификация электроракетных двигателей; иметь представление об основах рабочего процесса в ЭРД типа СПД.

Язык реализации дисциплины - русский.

2. Объём дисциплины

Вид учебной работы	Всего, час.	Объём по семестрам	
Контактная работа обучающегося с преподавателем по видам учебных занятий (КР):			
<i>Лекционные занятия (Л)</i>			
<i>Семинарские/ Практические занятия (СПЗ)</i>			
Самостоятельная работа обучающегося, в том числе подготовка к промежуточной аттестации (СР)			
Вид промежуточной аттестации: Зачет (З), Зачет с оценкой (ЗО), Экзамен (Э), Кандидатский экзамен (КЭ)			КЭ
Общий объём В часах			
В зачетных единицах			

3. Содержание дисциплины

№ пп	Наименование раздела/ темы	Содержание темы
	Тема 1: Введение	Введение Распространенность плазмы в природе, краткая характеристика космической и лабораторной плазмы: термоядерная плазма, плазма электрореактивных двигателей, классификация плазмы.
	Тема 2: Основные свойства плазмы.	Идеальная плазма. Электростатическое экранирование. Дебаевский радиус. Плазменные колебания. Скин-эффект. Двойной электрический слой. Электростатические зонды.
	Тема 3: Элементарные процессы в плазме.	Сечение процессов. Транспортное сечение передачи энергии и импульса. Скорость процесса. Частота столкновений. Средняя длина свободного пробега. Передача энергии и импульса в упругих столкновениях. Динамика упругого взаимодействия частиц. Классическая теория упругого рассеяния. Формула Резерфорда. Рассеяние на малые углы: область применимости классической теории рассеяния. Столкновения заряженных частиц. Ионизация электронным ударом. Томсоновская теория трехчастичной рекомбинации. Электрон-ионная трехчастичная рекомбинация. Типы элементарных процессов. Адиабатический критерий Мессе.
	Тема 4: Физическая кинетика плазмы	Уравнение Больцмана. τ - приближение. Уравнения неразрывности и движения для многокомпонентной системы.
	Тема 5: Статистика слабоионизованной плазмы.	Распределения Больцмана, Максвелла. Принцип детального равновесия. Закон действующих масс. Формула Эльверта. Распределение Саха.

	<p>Тема 6: Явления переноса в плазме.</p>	<p>Теория явлений диффузии, вязкости и теплопроводности в приближении средней длины свободного пробега. Правила смеси для коэффициентов диффузии, вязкости и теплопроводности в плазме. Подвижность частиц. Соотношение Эйнштейна Диффузия, теплопроводность с учетом внутренних степеней свободы частиц плазмы. Амбиполярная диффузия.</p>
	<p>Тема 7: Плазма во внешних полях.</p>	<p>Гидродинамическое приближение. Магнитное давление. Дрейфовое приближение. Электрический дрейф. Вмороженное магнитное поле. Термализованный потенциал. Ионно-оптическое приближение. Проводимость плазмы.</p>
	<p>Тема 8: Ускорение плазмы.</p>	<p>Проблемы ускорения заряженных частиц плазмы. Газодинамическое (тепловое) ускорение плазмы. Принцип действия электродуговых электроракетных двигателей. Ускорение тяжелых ионов плазмы электронным ветром. Принцип действия и конструкция торцевых электроракетных двигателей. Условия существования в плазме электрического поля. Ускорение ионов электрическим полем. Лоренцевские системы. Стационарный плазменный двигатель (СПД). Конструкция. Предварительные сведения о рабочем процессе в СПД.</p>
	<p>Тема 9: Волновые свойства плазмы.</p>	<p>Звуковые колебания в плазме. Собственные колебания в плазме: высокочастотная ветвь, ионный звук. Магнито-гидродинамические волны. Альфвеновская скорость. Распространение электромагнитной волны в плазме. Затухание плазменных колебаний в плазме. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами. Кинетические неустойчивости. Парадокс Ленгмюра. Бунемановская неустойчивость. Гидродинамические неустойчивости. Пинч-эффект. Нелинейные явления в плазме. Модуляционная неустойчивость. Солитоны. Спектр колебаний в плазме СПД. Роль плазменных колебаний в канале СПД. Характер проводимости ускорительного канала СПД.</p>

4. Учебно-тематический план дисциплины

Номер раздела, темы	Наименование разделов, тем	Количество часов					Форма контроля
		Всего	КР	Л	СПЗ	СР	
	Семестр 3						
	Тема 1: Введение	14	7	5	2	7	
	Тема 2: Основные свойства плазмы.	14	7	5	2	7	
3	Тема 3: Элементарные процессы в плазме.	14	7	5	2	7	
4	Тема 4: Физическая кинетика плазмы	15	7	5	3	7	
5	Тема 5: Статистика слабоионизованной плазмы.	15	8	4	3	8	
6	Семестр 4						КЭ
7	Тема 6: Явления переноса в плазме.	27	9	6	3	13	
8	Тема 7: Плазма во внешних полях.	27	9	6	3	14	
9	Тема 8: Ускорение плазмы.	27	9	6	3	13	
10	Тема 9: Волновые свойства плазмы.	27	9	6	3	14	
	Общий объем						

5. Учебно-методическое сопровождение самостоятельной работы обучающихся

Цель самостоятельной работы обучающихся заключается в глубоком, полном усвоении учебного материала и в развитии навыков самообразования. Самостоятельная работа может включать: работу с текстами, литературой, учебно-методическими пособиями, нормативными материалами, в том числе материалами сети интернет, а также проработку конспектов лекций, подготовка презентаций, рефератов, участие в работе семинаров, научных конференциях и пр.

Примерный перечень тем презентаций:

1. Предмет и задачи теоретической механики. Уравнения Лагранжа. Законы сохранения.
2. Динамика системы взаимодействующих частиц. Малые колебания. Динамика твердого тела. Канонические уравнения
3. Специальная теория относительности. Теория электромагнитного поля в вакууме. Электромагнитные волны в вакууме и веществе.
4. Введение в квантовую механику. Ограниченность классической теории и необходимость перехода к квантовым представлениям. Математический аппарат нерелятивистской квантовой механики. Точно решаемые задачи нерелятивистской квантовой механики.
5. Приближенные методы квантовой теории. Упругое рассеяние частиц. Релятивистская теория частиц со спином 0 и .. Физика элементарных частиц.

6. Основные принципы классической и квантовой статистики. Статистическое распределение для системы в термостате. Статистическая и феноменологическая термодинамика. Системы взаимодействующих частиц.
7. Системы с переменным числом частиц. Квантовые статистики Ферми и Бозе.
8. Флуктуации и броуновское движение. Кинетические уравнения.

6. Оценочные средства для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся

Перечень вопросов к кандидатскому экзамену:

Раздел 1. Физика плазмы

Плазма в природе и технике. Идеальная плазма. Электростатическое экранирование/Плазменные колебания. Скин-эффект Двойной слой. Скорость процесса, частота столкновений. Передача энергии в упругих столкновениях. Передача импульса в упругих столкновениях. Рассеяние на малые углы. Применимость классической теории. Типы элементарных процессов. Адиабатический критерий Мессе. Уравнение Больцмана. Функция распределения. Уравнения состояния плазмы. Плазма в магнитном поле. Магнитное давление. Электрический дрейф. Условия существования в плазме электрического поля. Проводимость плазмы. Форма спектральной линии. Равновесная плазма. Распределения Больцмана, Максвелла, Саха. Принцип детального равновесия. Формула Эльверта. Теплопроводность плазмы с учетом внутренних степеней свободы. Подвижность частиц. Соотношение Эйнштейна.

Раздел 2. Теория и расчет

ЭРДКосмический полет. Формула Циолковского – Мещерского. Электроракетный двигатель. Область применения. Конструктивная схема. Принцип действия. Основные параметры. Механика космического полета. Космическое пространство. Космические маневры. Движение в гравитационном поле космических тел. Электроракетная двигательная система. Целевая функция. Показатели качества. Подсистемы и показатели качества. Электроракетная двигательная система. Математическая модель. Массоэнергетические характеристики. Математические и физические модели процессов в ЭРД. Движение ионов и электронов в электрических и магнитных полях. Газодинамические параметры ЭРД. Плотность, давление, температура, длина свободного пробега, расход рабочего тела. Электрические схемы ЭРД. Зоны разряда в СПД. Модели колебаний. Электроракетный двигатель. Магнитная система двигателя. Методы расчета. Оптимизация параметров магнитной системы. Параметры. Электроракетный двигатель. Расчет параметров внутренней, наружной и анодной катушек.

Перспективные модели ЭРД. Возможности повышения силы тяги, удельного и суммарного импульсов. Понятие о двигателе с анодным слоем (ДАС). Сопоставление характеристик СПД и ДАС. Термокаталитический двигатель. Область применения. Конструктивная схема. Принцип действия.

Раздел 3. Конструкция и проектирование ЭРД

Общие сведения о двигателях и двигательных установках летательного аппарата, основные типы двигателей и двигательной установки. Состав и назначение ДУ. Логика работы ДУ. Классификация ДУ. Требования к ДУ, особенности применения, области применения. Особенности оптимизации параметров ДУ автономно и в составе КА. Компоновка ДУ на КА. Этапы проектирования. Принцип действия ДУ. Понятие о входных и выходных параметрах ДУ. Условия применения. Конструкция стационарного плазменного двигателя. Основы рабочего процесса. Узлы СПД: анод, катод, магнитная система, камера разрядная. Расчет и выбор конструктивных параметров и интегральных характеристик СПД, ресурсные характеристики. Различные схемы компоновки ДУ с СХП на космическом аппарате: моноблочные и блочные. Вопросы прочности. Выбор оптимального числа двигателей. Обеспечение требуемого теплового режима при моноблочном и блочном исполнении. Постановка задачи по проектированию. Выбор типа двигателя, системы подачи и системы питания. Расчет основных параметров агрегатов ДУ. Порядок проектирования. Выбор оптимальных параметров ДУМТ. Межблочные трубопроводы и кабели, требования и особенности применения. Конструкция двигательных блоков, блоков систем хранения и подачи, блоков систем электропитания и управления. Размещение блоков на КА. Совершенствование принципиальных схем уменьшение типономиналов элементной базы систем подачи, хранения, систем электропитания и управления. Улучшение энергомассовых характеристик ДУМТ. Повышение удельных характеристик двигателей. Характеристики перспективных ДУМТ.

Раздел 4. Системы хранения и подачи рабочего тела

Общие сведения о системах хранения и подачи рабочего тела в электроракетные двигатели малой тяги для летательных аппаратов, основные типы двигательных установок. Состав и назначение СХП, их классификация. Требования к СХП, особенности и области применения. Оптимизация параметров ДУ с СХП автономно и в составе космического аппарата. Рабочие вещества ДУ. Компоновка ДУ на базе ЭРД и СХП на КА. Понятие о входных и выходных параметрах СХП. Требования к СХП. Принципиальные схемы твердофазных, газовых,

жидкостных и жидкометаллических СХП. Постановка задачи по проектированию. Выбор типа СХП, расчет основных параметров ДУ. Конструктивные схемы баков для газообразных и жидких рабочих веществ. Требования к бакам. Конструкция различных баков, расчет и выбор оптимальных параметров, материалов. Баки из композитных материалов. Заправочная арматура: конструкция заправочных горловин, кранов, выбор параметров. Запорная арматура: конструкция пусковых клапанов, электромагнитных клапанов, расчет и выбор конструктивных параметров. Регулирующая арматура: конструкция редукторов, регулируемых жиклеров, термо- и пьезорегуляторы, стабилизаторы давления, жиклеры. Основные конструктивные параметры. Массовые характеристики ДУ с СХП различных схем. Выбор оптимальных параметров ДУ СХП. Межблочные трубопроводы, требования и особенности применения. Конструкция блоков систем хранения и подачи. Размещение блоков на КА. Совершенствование принципиальных схем, уменьшение типономиналов элементной базы систем хранения, систем подачи. Внутриэлементное резервирование. Улучшение массовых характеристик СХП. Характеристики перспективных СХП. Недостатки стендовой системы подачи рабочего тела и возможности их устранения с помощью универсальных тепловых микрорасходомеров новых конструкций.

Раздел 5. Теория и практика эксперимента на испытательном стенде ЭРД

Основы метода обобщенных переменных. Получение чисел подобия из математической формулировки задачи. Получение чисел подобия на основе анализа размерностей. π -теорема. Математическое планирование эксперимента (многофакторного). Виды, методы измерения. Метод измерения: принцип измерения и средство измерения. Измерения: прямые, косвенные, совместные. Расчет погрешностей эксперимента. Принципиальная схема испытательного стенда ЭРД. Стендовая система подачи рабочего тела. Система измерения расхода рабочего тела на стенде. Задание расхода рабочего тела. Назначение и устройство блока газораспределения (БГР или ХФС). Назначение и устройство термодросселя. Назначение анодной и катодной системы жиклеров. Устройство измерения силы тяги на испытательном стенде. Недостатки российских и зарубежных промышленных микрорасходомеров рабочего тела, используемых на испытательных стендах. Перспективные схемы отечественных универсальных микрорасходомеров инертных газов. Статистический анализ данных испытаний ЭРД на испытательном стенде: среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент асимметрии, двухпараметрический анализ, коэффициент связи.

7. Критерии оценивания результатов контрольно-оценочных мероприятий текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

В ходе текущего контроля успеваемости (устный или письменный опрос, подготовка и защита реферата, доклад, презентация, тестирование и пр.) при ответах на учебных занятиях, а также промежуточной аттестации в форме зачета обучающиеся оцениваются по двухбалльной шкале:

Оценка «зачтено» - выставляется аспиранту, если он продемонстрировал знания программного материала, подробно ответил на теоретические вопросы, справился с выполнением заданий и (или) ситуационных задач, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Оценка «не зачтено» - выставляется аспиранту, если он имеет пробелы в знаниях программного материала, не владеет теоретическим материалом и допускает грубые, принципиальные ошибки в выполнении заданий и (или) ситуационных задач, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Оценка по результатам проведения кандидатского экзамена по дисциплине выставляется на основе совокупности ответов по вопросам программы кандидатского экзамена и по вопросам дополнительной программы по теме диссертации аспиранта, которая согласовывается с научным руководителем.

Оценка «отлично» выставляется за исчерпывающий ответ, отражающий знание и профессиональное владение материалом программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «хорошо» выставляется за ответ, содержащий не принципиальные погрешности, отражающий знание и свободное владение материалом программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «удовлетворительно» выставляется за ответ, отражающий знание принципиальных положений вопросов, при наличии погрешностей, устраняемых аспирантом при ответе на дополнительные вопросы программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется за ответ, показывающий непонимание существа вопроса, наличия грубых ошибок в ответах на вопросы программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины Рекомендуемая литература:

Основная литература

1. Антипов С. Н. Криогенная плазма газового разряда/ С. Н. Антипов, А. В. Кириллин, В. Л. Низовский; Учреждение РАН, Объедин. ин-т высоких температур. - М.: Янус-К, 2011. - 131 с. НА(1)
2. Савинов, В. П. Физика высокочастотного емкостного разряда/ В. П. Савинов. - Москва: Физматлит, 2013. - 307 с. НА(1)
3. Зайцев Ф. С. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы/ Ф. С. Зайцев. - 2-е изд.. - М.: МАКС Пресс, 2011. - 639 с. НА(1)

Дополнительная литература

1. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. – М.: ФизматЛИТ, 2008. – 613 с. НА(1)
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Издательский дом «Интеллект», 2009. – 734 с. ч.з.№3(1)
3. Котельников В. А. Математическое моделирование обтекания тел потоками столкновительной и бесстолкновительной плазмы/ В. А. Котельников, М. В. Котельников, В. Ю. Гидаспов. - М.: Физматлит, 2010. - 266 с. ч.з.№3(1)
4. Брушлинский К. В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики/ К. В. Брушлинский. - М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009. - 200 с. НА(1)

Программное обеспечение:

«

2. ЭБС Кантиана (<http://lib.kantiana.ru/irbis/standart/ELIB>).
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>).

Электронные образовательные ресурсы:

и НЭБ Национальная электронная библиотека, диссертации и прочие издания
о ЭБС Консультант студента

н ПРОСПЕКТ ЭБС

а ЭБС ZNANIUM.COM

- ЭБС IBOOKS.RU

л Электронно-библиотечная система (ЭБС) Кантиана (<https://elib.kantiana.ru/>)

ь

Материально-техническое обеспечение дисциплины

ФФУ им. И. Канта имеет специальные помещения и лаборатории для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, научных исследований, промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы и помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования.

э

л

е

к

т

р

о

н

н

а

я