

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
природоподобных, плазменных и
ядерных технологий им. И.В.
Курчатова**

Т.Е. Григорьев

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Моделирование в термоядерных исследованиях
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Термоядерные и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.В. Мельников, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии плазмы 31.03.2025

Аннотация

Курс "Моделирование в термоядерных исследованиях" предусматривает освоение студентами фундаментальных знаний в области физики плазмы, изучение основных подходов к их описанию.

Задачи курса:

- формирование базовых представлений о методах моделирования плазменных процессов на основе различных подходов и приближений;
- формирование базовых знаний в области физики магнитного удержания, равновесия, устойчивости и переносов высокотемпературной плазмы, основах гидродинамики и динамике электромагнитного поля;
- формирование практических подходов к решению общезначимых задач на основе модели магнитной гидродинамики и статистической физики;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

По результатам освоения курса студент должен знать:

фундаментальные общезначимые принципы, на основе которых строится описание динамики рассматриваемых сред;

основные теоретические подходы и концепции в моделировании течений и динамики электромагнитного поля в системах, допускающих описание сплошной среды;

основные теоретические и экспериментальные результаты приложений рассматриваемых теорий к конкретным системам: газам, жидкостям, плазме;

пределы применимости рассматриваемых теорий и их конкретных приложений, и характерные численные значения рассматриваемых физических величин;

современные физические и математические проблемы в рассматриваемой области знаний;

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Суперкомпьютерное моделирование плазмы
2. Моделирование магнитного поля
3. Равновесие плазмы
4. МГД устойчивость
5. Траектории частиц
6. Столкновения
7. Переносы
8. Измерения плазмы
9. Большие термоядерные установки
10. Администрирование

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области физики плазмы, изучение основных подходов к их описанию.

Задачи дисциплины

- формирование базовых представлений о методах моделирования плазменных процессов на основе различных подходов и приближений;
- формирование базовых знаний в области физики магнитного удержания, равновесия, устойчивости и переносов высокотемпературной плазмы, основах гидродинамики и динамике электромагнитного поля;
- формирование практических подходов к решению общезначимых задач на основе модели магнитной гидродинамики и статистической физики;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики и химии плазмы в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

фундаментальные общефизические принципы, на основе которых строится описание динамики рассматриваемых сред;

основные теоретические подходы и концепции в моделировании течений и динамики электромагнитного поля в системах, допускающих описание сплошной среды;

основные теоретические и экспериментальные результаты приложений рассматриваемых теорий к конкретным системам: газам, жидкостям, плазме;

пределы применимости рассматриваемых теорий и их конкретных приложений, и характерные численные значения рассматриваемых физических величин;

современные физические и математические проблемы в рассматриваемой области знаний.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;

применять математический аппарат рассматриваемой теории для вывода практических важных следствий из неё;

применять базовые общефизические принципы для решения задач, возникающих при описании рассматриваемых сред;

абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;

использовать физические модели для конкретных процессов и проводить необходимые расчеты в рамках построенной физической модели;

применять рассматриваемые теоретические модели или их модификации в общем случае;

моделировать процессы и анализировать модели с использованием информационных технологий.

владеть:

базовыми подходами к постановке и решению общефизических задач;

основными математическими методами, характерными для теории сплошных сред;

математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Суперкомпьютерное моделирование плазмы	2	2		3
2	Моделирование магнитного поля	2	2		3
3	Равновесие плазмы	2	2		3
4	МГД устойчивость	1	1		3
5	Траектории частиц	2	2		3
6	Столкновения	1	1		3
7	Переносы	1	1		3
8	Измерения плазмы	2	2		3
9	Большие термоядерные установки	1	1		3
10	Администрирование	1	1		3
Итого часов		15	15		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Суперкомпьютерное моделирование плазмы

Современные вычислительные машины. Операционные системы. Компиляция, Intel Fortran, MatLab. Правила моделирования. Тестовые задачи и бенчмарк. Поиск ошибок. Сходимость.

2. Моделирование магнитного поля

Моделирование тороидального магнитного поля. Уравнение Био-Савара-Лапласа. Токамаки с круглым и вытянутым сечением плазмы. Гофрировка. Стеллараторы и модульные катушки.

3. Равновесие плазмы

Равновесие плазмы. Уравнение Грэда-Шафранова. Магнитные поверхности. Формат EQDSK. Коды DINA, EFIT, SPIDER, CAXE, VMES. Смещение плазмы и параметр β . Магнитные измерения. Ограничения моделей. Обратные задачи.

4. МГД устойчивость

МГД устойчивость плазмы. Коды KINX, MISHKA, CAS3D, TERPSICHORE. Виды неустойчивостей и критерии устойчивости. Оптимизация магнитных конфигураций. Искусственный интеллект и шахматная программа “Кентавр”. Альфвеновский континуум.

5. Траектории частиц

Траектории заряженных частиц в плазме. Дрейфовое приближение. Инварианты движения. Коды ORBIT, VENUS, HAGIS. Резонансное взаимодействие частиц с волнами. Затухание Ландау и Альфвеновские собственные моды.

6. Столкновения

Неоклассические столкновения в плазме. Уравнение Власова. Методы δf , Монте-Карло и генерация случайных чисел. Бутстрэп ток. Кластеры, MPI и сети.

7. Переносы

Моделирование переносов в плазме. Код ASTRA. Убегающие электроны. Электронно-циклотронный нагрев, гиротроны и код OGRAY. Турбулентность и код GENE.

8. Измерения плазмы

Моделирование экспериментальных измерений электрического потенциала плазмы с помощью пучка тяжелых ионов. Рефлектометрия и моделирование турбулентности.

9. Большие термоядерные установки

Особенности моделирования плазмы для термоядерных установок - ИТЭР, JET, T-10, T-15, LHD, W7X. Современные численные задачи по материалам совещаний международных групп по физике токамаков ИТРА.

10. Администрирование

Теория и моделирование плазмы в разных странах. Список экспертов. Конференции и вакансии. Финансовые, моральные и юридические особенности моделирования. Топ суперкомпьютеров. Распределение ресурсов.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. К.Миямото. Основы физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. М.: Физматлит, 2007.
2. ITER Physics Basis, Nuclear Fusion, 2007.
3. Б.А. Трубников. Теория плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.
4. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике. М.: Наука, 1974.
5. А.А. Сковорода. Магнитные ловушки для удержания плазмы. М.: Физматлит, 2009.
6. Ю.Н. Днестровский, Д.П. Костомаров. Математическое моделирование плазмы. М.: Физматлит. 1993.

Дополнительная литература

Ф.С. Зайцев. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е изд, М.: Макс Пресс. 2011.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Курчатовский суперкомпьютерный центр computing.kiae.ru

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

не предусмотрено.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Термоядерные и плазменные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и химии плазмы
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.В. Мельников, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование в термоядерных исследованиях» обучающийся должен:

знать:

фундаментальные общефизические принципы, на основе которых строится описание динамики рассматриваемых сред;

основные теоретические подходы и концепции в моделировании течений и динамики электромагнитного поля в системах, допускающих описание сплошной среды;

основные теоретические и экспериментальные результаты приложений рассматриваемых теорий к конкретным системам: газам, жидкостям, плазме;

пределы применимости рассматриваемых теорий и их конкретных приложений, и характерные численные значения рассматриваемых физических величин;

современные физические и математические проблемы в рассматриваемой области знаний.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;

применять математический аппарат рассматриваемой теории для вывода практических важных следствий из неё;

применять базовые общефизические принципы для решения задач, возникающих при описании рассматриваемых сред;

абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;

использовать физические модели для конкретных процессов и проводить необходимые расчеты в рамках построенной физической модели;

применять рассматриваемые теоретические модели или их модификации в общем случае;

моделировать процессы и анализировать модели с использованием информационных технологий.

владеть:

базовыми подходами к постановке и решению общефизических задач;

основными математическими методами, характерными для теории сплошных сред;

математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

1. Современные вычислительные машины. Операционные системы. Компиляция, Intel Fortran, MatLab. Правила моделирования. Тестовые задачи и бенчмарк. Поиск ошибок. Сходимость.
2. Моделирование тороидального магнитного поля. Уравнение Био-Савара-Лапласа. Токамаки с круглым и вытянутым сечением плазмы. Гофрировка. Стеллараторы и модульные катушки.
3. Равновесие плазмы. Уравнение Грэда-Шафранова. Магнитные поверхности. Формат EQDSK. Коды DINA, EFIT, SPIDER, CAXE, VMES. Смещение плазмы и параметр β . Магнитные измерения. Ограничения моделей. Обратные задачи.
4. МГД устойчивость плазмы. Коды KINX, MISHKA, CAS3D, TERPSICHORE. Виды неустойчивостей и критерии устойчивости. Оптимизация магнитных конфигураций. Искусственный интеллект и шахматная программа "Кентавр".
5. Траектории заряженных частиц в плазме. Дрейфовое приближение. Инварианты движения. Коды ORBIT, VENUS, HAGIS. Резонансное взаимодействие частиц с волнами.
6. Неоклассические столкновения в плазме. Уравнение Власова. Методы δf , Монте-Карло и генерация случайных чисел. Бутстрэп ток. Кластеры, MPI и сети.
7. Моделирование переносов в плазме. Код ASTRA. Убегающие электроны. Электронно-циклотронный нагрев, гиротроны и код OGRAY.
8. Моделирование экспериментальных измерений электрического потенциала плазмы с помощью пучка тяжелых ионов. Рефлектометрия и моделирование турбулентности.
9. Особенности моделирования плазмы для термоядерных установок - ИТЭР, JET, T-10, T-15, LHD, W7X. Современные численные задачи по материалам совещаний международных групп по физике токамаков ИТРА.
10. Теория и моделирование плазмы в разных странах. Список экспертов. Конференции, вакансии и финансовые трудности.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Современные вычислительные машины. Операционные системы. Компиляция, Intel Fortran, MatLab. Правила моделирования. Тестовые задачи и бенчмарк. Поиск ошибок. Сходимость.
2. Моделирование экспериментальных измерений электрического потенциала плазмы с помощью пучка тяжелых ионов. Рефлектометрия и моделирование турбулентности.

Пример 2.

1. Равновесие плазмы. Уравнение Грэда-Шафранова. Магнитные поверхности. Формат EQDSK. Коды DINA, EFIT, SPIDER, CAXE, VMES. Смещение плазмы и параметр β . Магнитные измерения. Ограничения моделей. Обратные задачи.
2. Теория и моделирование плазмы в разных странах. Список экспертов. Конференции, вакансии и финансовые трудности.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Устный экзамен проводится по билетам. Опрос студента на экзамене не должен превышать 1 астрономического часа