

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОГО ИНЖЕНЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/0821-573.1

от 31.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.04.02 Ядерные физика и технологии

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
2	4	144	8	37	0		63	0	Э
Итого	4	144	8	37	0	24	63	0	

## АННОТАЦИЯ

Целями освоения учебной дисциплины «Вычислительная гидродинамика и теплофизика» является:

- обучение студентов основам математического моделирования и методам численного анализа гидродинамических и теплообменных процессов;

- формирование у студентов практических навыков пакетного моделирования гидродинамических и тепловых процессов в энергетических установках, а также решения фундаментальных и прикладных задач науки и техники с помощью современных суперкомпьютерных систем.

Задачи дисциплины:

- формирование у студентов базовых знаний в области гидродинамики и теплообмена, а также знаний основных принципов построения математических моделей и их компьютерных аналогов;

- освоение студентами современных методов проектирования прикладного программного обеспечения, ориентированного на научно-технические приложения, и объектно-ориентированного программирования;

- овладение студентами принципами создания алгоритмов и прикладных программ высокого уровня сложности для численного моделирования гидродинамических и теплообменных процессов;

- формирование у студентов практических навыков моделирования гидродинамических и теплообменных процессов на современных компьютерных и суперкомпьютерных системах;

- практическое применение студентами полученных знаний при выполнении выпускных работ на степень магистра.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины «Вычислительная гидродинамика и теплофизика» является:

- обучение студентов основам математического моделирования и методам численного анализа гидродинамических и теплообменных процессов;

- формирование у студентов практических навыков пакетного моделирования гидродинамических и тепловых процессов в энергетических установках, а также решения фундаментальных и прикладных задач науки и техники с помощью современных суперкомпьютерных систем.

Задачи дисциплины:

- формирование у студентов базовых знаний в области гидродинамики и теплообмена, а также знаний основных принципов построения математических моделей и их компьютерных аналогов;

- освоение студентами современных методов проектирования прикладного программного обеспечения, ориентированного на научно-технические приложения, и объектно-ориентированного программирования;

- овладение студентами принципами создания алгоритмов и прикладных программ высокого уровня сложности для численного моделирования гидродинамических и теплообменных процессов;

- формирование у студентов практических навыков моделирования гидродинамических и теплообменных процессов на современных компьютерных и суперкомпьютерных системах;
- практическое применение студентами полученных знаний при выполнении выпускных работ на степень магистра.

## 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Учебная программа соответствует требованиям образовательного стандарта высшего образования национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по направлению 14.04.02 - Ядерные физика и технологии.

## 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
УКЦ-1 [1] – Способен решать исследовательские, научно-технические и производственные задачи в условиях неопределенности, в том числе выстраивать деловую коммуникацию и организовывать работу команды с использованием цифровых ресурсов и технологий в цифровой среде	В-УКЦ-1 [1] – Владеть навыками решения исследовательских, научно-технических и производственных задач с использованием цифровых технологий З-УКЦ-1 [1] – Знать современные цифровые технологии, используемые для выстраивания деловой коммуникации и организации индивидуальной и командной работы У-УКЦ-1 [1] – Уметь подбирать наиболее релевантные цифровые решения для достижения поставленных целей и задач, в том числе в условиях неопределенности
УКЦ-2 [1] – Способен к самообучению, самоактуализации и саморазвитию с использованием различных цифровых технологий в условиях их непрерывного совершенствования	З-УКЦ-2 [1] – Знать основные цифровые платформы, технологии и интернет ресурсы используемые при онлайн обучении У-УКЦ-2 [1] – Уметь использовать различные цифровые технологии для организации обучения В-УКЦ-2 [1] – Владеть навыками самообучения, самоактуализации и саморазвития с использованием различных цифровых технологий

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно- исследовательский			

<p>Выработка направлений и проведение прикладных научных исследований в области по повышения эффективности и безопасности объектов использования атомной энергии.</p>	<p>Объекты использования атомной энергии.</p>	<p>ПК-3 [1] - Способен оценивать перспективы развития атомной отрасли, использовать ее современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательской деятельности</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.008</p>	<p>З-ПК-3[1] - Знать достижения научно-технического прогресса ; У-ПК-3[1] - Уметь применять полученные знания к решению практических задач.; В-ПК-3[1] - владеть методами моделирования физических процессов.</p>
<p>Выработка направлений и проведение прикладных научных исследований в области по повышения эффективности и безопасности объектов использования атомной энергии.</p>	<p>Объекты использования атомной энергии.</p>	<p>ПК-4 [1] - Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.008</p>	<p>З-ПК-4[1] - Знать: цели и задачи проводимых исследований; основные методы и средства проведения экспериментальных и теоретических исследований; методы и средства математической обработки результатов экспериментальных данных ; У-ПК-4[1] - Уметь: применять методы проведения экспериментов; использовать математические методы обработки результатов исследований и их обобщения; оформлять результаты научно-исследовательских работ; В-ПК-4[1] - Владеть: навыками самостоятельного выполнения экспериментальных и теоретических исследования для решения научных и производственных</p>

	инновационный		задач
Исследования и разработки, направленные на создание новой технологической платформы атомной энергетики, расчетное сопровождение энергетического оборудования, обоснование ядерной и радиационной безопасности объектов использования атомной энергии.	Ядерные энерготехнологии нового поколения; функциональные и конструкционные материалы ядерных реакторов; программные комплексы и математические модели для теоретического и расчетно-аналитического анализа безопасности АЭС, объекты использования атомной энергии и ядерного наследия, в части научно-технического и организационно-правового обоснования и обеспечения безопасности.	ПК-13 [1] - Способен проектировать, создавать и внедрять новые продукты и системы и применять теоретические знания в реальной инженерной практике  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078	3-ПК-13[1] - Знать математические методы и компьютерные технологии, необходимые для проектирования и разработки программного обеспечения для инженерного анализа инновационных продуктов. ; У-ПК-13[1] - Уметь разрабатывать и тестировать программное обеспечение для инженерного анализа инновационных продуктов.; В-ПК-13[1] - владеть навыками разработки и тестирования программного обеспечения для инженерного анализа инновационных продуктов.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Модели гидродинамики и теплообмена	1-8	4/18/0	КИ-8 (25)	25	КИ-8	3-ПК-13, У-ПК-13, В-ПК-13,

							3-УКЦ-1, У-УКЦ-1, В-УКЦ-1, 3-УКЦ-2, У-УКЦ-2, В-УКЦ-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4
2	Модели динамически и термодинамически неравновесной двухфазной среды	9-15	4/19/0	КИ-15 (25)	25	КИ-15	3-ПК-13, У-ПК-13, В-ПК-13, 3-УКЦ-1, У-УКЦ-1, В-УКЦ-1, 3-УКЦ-2, У-УКЦ-

							2, В- УКЦ- 2, 3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, 3-ПК- 4, У- ПК-4, В- ПК-4
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		8/37/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	Э	В- УКЦ- 2, 3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, 3-ПК- 4, У- ПК-4, В- ПК-4, 3-ПК- 13, У- ПК- 13, В- ПК- 13, 3- УКЦ- 1, У- УКЦ- 1, В- УКЦ- 1, 3- УКЦ- 2,

							У- УКЦ- 2
--	--	--	--	--	--	--	-----------------

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	8	37	0
<b>1-8</b>	<b>Модели гидродинамики и теплообмена</b>	4	18	0
1 - 8	<b>Модели гидродинамики и теплообмена</b> Основные понятия механики сплошных сред. Обзор наиболее употребительных математических моделей сплошных сред. Лагранжев и эйлеров подходы к описанию сплошной среды. Система уравнений Эйлера. Различные формы дифференциального уравнения энергии в движущейся среде. Обзор моделей теплообмена – конвективный, кондуктивный, радиационный. Модель вязкой среды. Диффузия в газах и жидкостях. Система уравнений Навье-Стокса. Обобщение системы Навье-Стокса на случай теплопроводной многокомпонентной среды. Постановки начально-краевых задач в теории теплообмена. Задачи сопряженного теплообмена. Элементы теории размерностей. Подобие физических явлений. Теория подобия и П-теорема. Ламинарные и турбулентные течения. Переход к турбулентному режиму течения. Критическое число Рейнольдса. Вихревая структура турбулентных течений. Энергия и масштаб турбулентности. Основные математические подходы к анализу турбулентности. Вывод уравнений для характеристик турбулентности. Осредненные по Рейнольдсу уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Теплообмен в турбулентной среде. Уравнения для температурных параметров турбулентности. Осредненная форма уравнения энергии. Классификация моделей турбулентности. Алгебраические модели турбулентности. Дифференциальные модели с	Всего аудиторных часов		
		4	18	0
		Онлайн		
		0	0	0

	<p>одним и двумя параметрами турбулентности. Алгебраические и дифференциальные модели рейнольдсовых напряжений. Моделирование турбулентности на основе концепции крупных вихрей. Сетка и сеточные функции. Метрические свойства разностной сетки. Аппроксимации дифференциальных операторов первого и второго порядков на сетках регулярной структуры. Погрешность аппроксимации. Разностная схема. Устойчивость разностных схем. Связь аппроксимации, устойчивости и сходимости разностных схем.</p> <p>Конечно-разностные и конечно-объемные аппроксимации на неструктурированных сетках. Метод конечных элементов.</p> <p>Консервативные разностные схемы. Однородные разностные схемы. Монотонность разностных схем. Метод опорных операторов как способ согласованной аппроксимации основных операций векторного анализа. Разностные схемы метода опорных операторов для уравнения Пуассона.</p> <p>Аппроксимация нестационарных уравнений. Принцип расщепления по физическим процессам. Схемы суммарной аппроксимации.</p> <p>Методы решения нелинейных уравнений разностных гидродинамических моделей с учетом диссипативных процессов.</p>			
9-15	<b>Модели динамически и термодинамически неравновесной двухфазной среды</b>	4	19	0
9 - 15	<b>Модели динамически и термодинамически неравновесной двухфазной среды</b> Дискретные модели сплошной среды. Модель динамически и термодинамически неравновесной двухфазной среды. Система уравнений массового, динамического и энергетического балансов для парокапельной среды. Уравнения конвекции-диффузии для неконденсируемого газа и твердых примесей. Замыкание системы уравнений динамики двухфазной среды - уравнения состояния. Различные модели течения конденсирующегося и влажного пара. Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности: решение Нуссельта, анализ основных допущений. Кипение жидкостей. Условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Анализ размерностей. Параметры подобия для системы уравнений двухфазной среды. Оценки характерных скоростей основных процессов. Типовые задачи динамики двухфазных сред. Количественные характеристики и режимы течения двухфазных потоков в трубах. Характер изменения среднемассовой температуры жидкости, температуры	Всего аудиторных часов		
		4	19	0
		Онлайн		
		0	0	0

	<p>стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала.</p> <p>Задачи динамики двухфазных сред в контурно-гидравлических теплообменных сетях ЯЭУ. Течение в необогреваемой трубе с постоянным расходом и скачкообразным изменении энтальпии теплоносителя на входе.</p> <p>Течение в равномерно обогреваемой трубе с постоянным расходом теплоносителя на входе и заданным законом изменения во времени энтальпии теплоносителя на входе и интегральной мощности, подводимой к теплоносителю.</p> <p>Мгновенное открытие задвижки на входе необогреваемого объема с гомогенной средой в условиях отсутствия потерь на трение в гидравлическом соединении.</p> <p>Мгновенное изменение давления на входе необогреваемого объема с гомогенной средой в условиях наличия потерь на трение в гидравлическом соединении.</p>			
--	---	--	--	--

Сокращенные наименования онлайн опций:

<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

#### ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

<b>Недели</b>	<b>Темы занятий / Содержание</b>
	<i>2 Семестр</i>
1 - 8	<p><b>Занятия 1</b></p> <p>Темы лабораторных работ связаны с основными понятиями численных методов и их реализации в пакетах ANSYS CFX, Flow Vision, Abacus, OpenFOAM.</p> <p>Темы лабораторных работ связаны с реализацией вычислительного эксперимента в ранее изученных пакетах и являются подготовкой студента к выполнению курсовой работы.</p>
9 - 15	<p><b>Занятия 2</b></p> <p>Темы курсовых работ связаны с решением задач динамики двухфазных сред в контурно-гидравлических теплообменных сетях ЯЭУ. Курсовая работа считается защищенной, если соответствующая задача решена с помощью одного из изученных пакетов (ANSYS CFX, Flow Vision, Abacus, Open FOAM) на учебном кластере ИПМ им.М.В.Келдыша РАН в соответствии с</p>

требованиями, указанным в задании на курсовую работу.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы дисциплины «Вычислительная гидродинамика и теплофизика» используются различные образовательные технологии:

– во время аудиторных занятий обучение проводится в форме лекций (с визуализацией) и семинаров, в рамках последних проводится практическое закрепление теории и подготовка к самостоятельному выполнению в удаленном режиме лабораторных заданий;

– для контроля усвоения магистрами разделов данного курса используется проверка выполнения студентами лабораторных заданий, а также семестровый контроль;

– самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного и семинарского материала, самостоятельное выполнение в удаленном режиме лабораторных заданий, подготовка к экзамену по дисциплине в зимнем семестре, выполнение курсовой работы по индивидуальным заданиям и подготовка к экзамену в весеннем семестре.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

<b>Компетенция</b>	<b>Индикаторы освоения</b>	<b>Аттестационное мероприятие (КП 1)</b>
ПК-13	З-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-3	З-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-3	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-4	З-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-15
УКЦ-1	В-УКЦ-1	Э, КИ-8, КИ-15
	З-УКЦ-1	Э, КИ-8, КИ-15
	У-УКЦ-1	Э, КИ-8, КИ-15
УКЦ-2	З-УКЦ-2	Э, КИ-8, КИ-15
	У-УКЦ-2	Э, КИ-8, КИ-15
	В-УКЦ-2	Э, КИ-8, КИ-15

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-

балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ П 12 Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2021
2. ЭИ Л 69 Примеры и задачи по тепломассообмену : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
3. ЭИ Д 36 Тепломассообмен : , Санкт-Петербург: Лань, 2022

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ К42 Numerical Methods and Modelling for Engineering : , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. 531 Т 32 Математическое моделирование в механике сплошных сред : , Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2019
3. 53 Л22 Теоретическая физика Т.1 Механика, Москва: Физматлит, 2013
4. 53 Л22 Теоретическая физика Т.6 Гидродинамика, , Москва: Физматлит, 2006
5. 53 Л22 Теоретическая физика Т.7 Теория упругости, , М.: Наука, 2007
6. 519 С17 Введение в численные методы : учебное пособие для вузов, А. А. Самарский, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2009
7. 519 С17 Задачи и упражнения по численным методам : , А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич, Е. А. Самарская , Москва: Либроком, 2009
8. 53 Л22 Теоретическая физика Т.10 Физическая кинетика, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский, Москва: Физматлит, 2007

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Цель методических рекомендаций для студента – оптимизация процесса изучения данной дисциплины.

Материалы учебно-методического комплекса выдаются в электронном виде. Эти материалы не являются дословным изложением лекций и семинаров, а лишь их кратким содержанием. Они должны активно использоваться при подготовке домашних заданий и к экзамену.

Следует помнить, что в тестовые и экзаменационные вопросы не входит материал, который не был прочитан на лекциях или обсужден на семинарах. Тем не менее, для целей эффективного использования полученных знаний рекомендуется ознакомиться с интернет –

ресурсами и литературой. В рекомендованной литературе изучаемые вопросы рассматриваются более глубоко, их изучение повышает квалификацию будущего специалиста.

Задачи домашнего задания аналогичны рассматриваемым на семинарских занятиях, поэтому рекомендуется выполнять их последовательно по мере изучения материала на занятиях.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

При разработке курса использована современная отечественная и иностранная литература. Чтение лекций и проведение семинарских занятий рекомендуется проводить в дисплейных классах. Сложные и многочисленные расчеты не должны затенять сути излагаемых методов. Особое внимание студентов следует обратить на интернет ресурсы, где впоследствии они самостоятельно смогут получать актуальную информацию по читаемым темам. В конце изучения курса рекомендуется выдать студентам использованные презентации в электронном виде.

Для проверки и закрепления практических навыков студентам предлагается выполнить индивидуальные домашние задания.

Автор(ы):

Болдарев Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н.

Гасилов Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н.,  
профессор

Рецензент(ы):

профессор Ю.Б. Иванов