

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования "Пермский  
государственный национальный исследовательский  
университет"**

**Кафедра теоретической физики**

Авторы-составители: **Тарунин Евгений Леонидович**  
**Гаврилов Константин Алексеевич**  
**Циберкин Кирилл Борисович**  
**Демин Виталий Анатольевич**

Рабочая программа дисциплины  
**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРОДИНАМИКЕ**  
Код УМК 61997

Утверждено  
Протокол №6  
от «04» июня 2021 г.

Пермь, 2021

## **1. Наименование дисциплины**

Численные методы в гидродинамике

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина входит в обязательную часть Блока « Б.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **03.03.02** Физика

направленность Фундаментальная физика

### **3. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

В результате освоения дисциплины **Численные методы в гидродинамике** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

**03.03.02** Физика (направленность : Фундаментальная физика)

**ОПК.4** Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные

#### **Индикаторы**

**ОПК.4.1** Формулирует задачи, исходя, из поставленной цели и выбирает способы их решения

**ПК.2** Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта

#### **Индикаторы**

**ПК.2.1** Осуществляет проведение литературного обзора в выбранном направлении исследования

**ПК.2.2** Осуществляет проведение теоретического (экспериментального) исследования в рамках поставленной задачи, обработку и анализ полученных результатов

#### 4. Объем и содержание дисциплины

<b>Направления подготовки</b>	03.03.02 Физика (направленность: Фундаментальная физика)
<b>форма обучения</b>	очная
<b>№№ триместров, выделенных для изучения дисциплины</b>	11
<b>Объем дисциплины (з.е.)</b>	3
<b>Объем дисциплины (ак.час.)</b>	108
<b>Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе:</b>	42
<b>Проведение лекционных занятий</b>	14
<b>Проведение лабораторных работ, занятий по иностранному языку</b>	28
<b>Самостоятельная работа (ак.час.)</b>	66
<b>Формы текущего контроля</b>	Входное тестирование (1) Итоговое контрольное мероприятие (1) Письменное контрольное мероприятие (2)
<b>Формы промежуточной аттестации</b>	Зачет (11 триместр)

## **5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины**

### **Численные методы в гидродинамике. Первый семестр**

#### **Конечно-разностные методы решения уравнений в частных производных**

Конечно-разностные аппроксимации производных. Устойчивость и сходимость разностных схем. Методы анализа устойчивости и сходимости. Методы решения конечно-разностных уравнений. Скалярная прогонка. Свойства разностных схем. Тесты. Решение уравнений с переменными коэффициентами и нелинейных уравнений. Граничные условия. Итерационные методы.

#### **Методы решения задач гидродинамики вязкой жидкости**

Численный эксперимент. Методы решения уравнений Навье-Стокса. Двухполевой метод. Граничные условия для вихря и функции тока. Сходимость двухполевого метода. Тестовые задачи. Метод последовательности сеток. Определение порога гидродинамической устойчивости методом сеток. Решение задачи о фазовом переходе со свободной конвекцией (задачи Стефана).

#### **Программные пакеты вычислительной гидродинамики**

Современные программные пакеты и комплексы решения задач вычислительной гидродинамики. Метод конечных элементов, метод конечных объёмов. Обзор профессиональных программных пакетов ANSYS Fluent, ANSYS CFX, OpenFOAM и др.

#### **Примеры задач свободной конвекции в замкнутых объёмах**

Точные решения задач. Конвекция в прямоугольной полости при подогреве сбоку. Надкритические режимы течения. Устойчивость течений.

## **6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

## **7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

## 8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная:

1. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов/В. М. Головизнин [и др.].-Москва:Московский университет,2013, ISBN 978-5-211-06426-3.-4661.-Библиогр. в конце глав
2. Тарунин Е. Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции:учеб. пособие/Е. Л. Тарунин.-Иркутск:Изд-во Иркут. ун-та,1990, ISBN 5-7430-0150-2.-223.-Библиогр.: с. 219-224
3. Емельянов, В. Н. Численные методы: введение в теорию разностных схем : учебное пособие для академического бакалавриата / В. Н. Емельянов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 188 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-06617-3. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. <https://www.urait.ru/bcode/438073>

### Дополнительная:

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. учебное пособие для студентов физических специальностей университетов: В 10 т. Т. 6. Гидродинамика/Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц.-Москва:Наука,1986.-736
2. Ландик Л. В.,Сергеев О. Б. Разностные методы для решения задач механики жидкости и газа:учебное пособие/Л. В. Ландик, О. Б. Сергеев.-Пермь,2012, ISBN 978-5-7944-1914-6.-1.  
<http://www.campus.psu.ru/library/node/32606>
3. Русаков С. В.,Вьюжанина Е. В.,Федоровцева Е. Н. Методы теории возмущений:учебно-методическое пособие по спецкурсу/С. В. Русаков, Е. В. Вьюжанина, Е. Н. Федоровцева ; ред. С. В. Русаков.-Пермь,2003, ISBN 5-7944-0357-8.-96.-Библиогр.: с. 95

## **9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

[library.psu.ru/node/738](http://library.psu.ru/node/738) Ресурсы Научной библиотеки ПГНИУ

## **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Образовательный процесс по дисциплине **Численные методы в гидродинамике** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

- доступ в режиме on-line в Электронную библиотечную систему (ЭБС)
- доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.
- Интернет-сервисы и электронные ресурсы (поисковые системы, электронная почта и т.д.)

Перечень необходимого лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения:

- приложение, позволяющее просматривать PDF-файлы
- офисный пакет приложений «LibreOffice».
- Электронные мультимедийные учебники и учебные пособия по вычислительной математике и моделированию;
- Свободный компилятор gfortran языка FORTRAN;
- Графический пакет GNUplot;
- Пакет аналитических вычислений Maxima;
- Пакет численного моделирования Octave;

Дополнительный перечень используемых информационных технологий и программного обеспечения определяется читающими курс преподавателями

При освоении материала и выполнения заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ ([student.psu.ru](http://student.psu.ru)).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

- система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).
- система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.
- система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

## **11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для лекционных занятий требуется аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения лабораторных работ - компьютерный класс, оснащенный презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) и компьютерной техникой с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для групповых (индивидуальных) консультаций - аудитория, оснащенная презентационной техникой



(проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения текущего контроля - компьютерный класс, оснащенный презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) и компьютерной техникой с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Самостоятельная работа студентов: аудитория, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», с обеспеченным доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, помещения Научной библиотеки ПГНИУ

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине  
Численные методы в гидродинамике**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.  
Индикаторы и критерии их оценивания**

**ОПК.4**

**Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные**

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p><b>ОПК.4.1</b> Формулирует задачи, исходя, из поставленной цели и выбирает способы их решения</p>	<p>Знать современные программные пакеты и комплексы решения задач вычислительной гидродинамики. Уметь формулировать и адаптировать задачи для программных пакетов. Владеть профессиональными программными пакетами (OpenFOAM).</p>	<p align="center"><b>Неудовлетворител</b></p> <p>Не знает современные программные пакеты и комплексы решения задач вычислительной гидродинамики. Не умеет формулировать и адаптировать задачи для программных пакетов. Не владеет профессиональными программными пакетами (OpenFOAM).</p> <p align="center"><b>Удовлетворительн</b></p> <p>Общие, но не структурированные знания современных программных пакетов и комплексов решения задач вычислительной гидродинамики. Демонстрирует частично сформированное умение формулировать и адаптировать задачи для программных пакетов. Имеет представление о профессиональных программных пакетах (OpenFOAM).</p> <p align="center"><b>Хорошо</b></p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания современных программных пакетов и комплексов решения задач вычислительной гидродинамики. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения формулировать и адаптировать задачи для программных пакетов. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет профессиональными программными пакетами (OpenFOAM).</p> <p align="center"><b>Отлично</b></p> <p>Сформированные систематические знания современных программных пакетов и комплексов решения задач вычислительной гидродинамики. Сформированное умение формулировать и адаптировать задачи для программных пакетов. Успешное и систематическое применение навыков</p>

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
		<p align="center"><b>Отлично</b></p> владения профессиональными программными пакетами (OpenFOAM).

## ПК.2

**Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта**

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p><b>ПК.2.1</b> Осуществляет проведение литературного обзора в выбранном направлении исследования</p>	<p>Знать базовые методы решения конечно-разностных уравнений. Уметь использовать конечно-разностные аппроксимации производных. Владеть навыками поиска и реализации методов решения профессиональных задач с использованием современных информационных технологий.</p>	<p align="center"><b>Неудовлетворител</b></p> <p>Не знает базовые методы решения конечно-разностных уравнений. Не умеет использовать конечно-разностные аппроксимации производных. Не владеет навыками поиска и реализации методов решения профессиональных задач с использованием современных информационных технологий.</p> <p align="center"><b>Удовлетворительн</b></p> <p>Общие, но не структурированные знания базовых методов решения конечно-разностных уравнений. Частично сформированное умение производить расчёты конечно-разностных аппроксимаций производных. Демонстрирует частично сформированное умение решения профессиональных задач.</p> <p align="center"><b>Хорошо</b></p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания базовых методов решения конечно-разностных уравнений. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения производить расчёты конечно-разностными методами. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет навыками решения профессиональных задач.</p> <p align="center"><b>Отлично</b></p> <p>Сформированные систематические знания базовых методов решения конечно-разностных уравнений. Сформированное</p>

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
		<p style="text-align: center;"><b>Отлично</b></p> <p>умение производить расчёты конечно-разностных аппроксимаций производных. Успешное и систематическое применение навыков решения профессиональных задач.</p>
<p><b>ПК.2.2</b> Осуществляет проведение теоретического (экспериментального) исследования в рамках поставленной задачи, обработку и анализ полученных результатов</p>	<p>Знать методику постановки и проведения численного эксперимента. Уметь определять пороги гидродинамической устойчивости при выполнении расчётов методом сеток. Владеть двухполюсным методом решения уравнений Навье-Стокса</p>	<p style="text-align: center;"><b>Неудовлетворител</b></p> <p>Не знает основные принципы постановки и проведения численного эксперимента. Не умеет определять порог гидродинамической устойчивости методом сеток. Не владеет двухполюсным методом решения уравнения Навье-Стокса.</p> <p style="text-align: center;"><b>Удовлетворительн</b></p> <p>Общие, но не структурированные знания принципов постановки и проведения численного эксперимента. Демонстрирует частично сформированное умение производить анализ устойчивости методом сеток. Имеет представление о двухполюсном методе решения уравнения Навье-Стокса.</p> <p style="text-align: center;"><b>Хорошо</b></p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания принципов постановки и проведения численного эксперимента. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения производить анализ устойчивости методом сеток. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет двухполюсным методом решения уравнения Навье-Стокса.</p> <p style="text-align: center;"><b>Отлично</b></p> <p>Сформированные систематические знания принципов постановки и проведения численного эксперимента. Сформированное умение производить анализ устойчивости методом сеток. Успешное и систематическое применение навыков решения уравнения Навье-Стокса двухполюсным методом.</p>

## Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : СУОС

**Вид мероприятия промежуточной аттестации :** Зачет

**Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации :** Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

**Максимальное количество баллов :** 100

### Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 43 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 43 балла

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
<b>Входной контроль</b>	Конечно-разностные методы решения уравнений в частных производных <b>Входное тестирование</b>	Навыки программирования. Работа с циклами. Задание массивов. Работа с файлами.
<b>ПК.2.1</b> Осуществляет проведение литературного обзора в выбранном направлении исследования	Методы решения задач гидродинамики вязкой жидкости <b>Письменное контрольное мероприятие</b>	Конечно-разностные методы решения уравнений в частных производных. Методы решения задач гидродинамики вязкой жидкости
<b>ОПК.4.1</b> Формулирует задачи, исходя, из поставленной цели и выбирает способы их решения	Программные пакеты вычислительной гидродинамики <b>Письменное контрольное мероприятие</b>	Альтернативные методы численного моделирования. Программные пакеты вычислительной гидродинамики
<b>ПК.2.2</b> Осуществляет проведение теоретического (экспериментального) исследования в рамках поставленной задачи, обработку и анализ полученных результатов	Примеры задач свободной конвекции в замкнутых объемах <b>Итоговое контрольное мероприятие</b>	Примеры задач свободной конвекции в замкнутых объемах

### Спецификация мероприятий текущего контроля

#### Конечно-разностные методы решения уравнений в частных производных

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**

Проходной балл: **0**

Показатели оценивания	Баллы
Навыки алгоритмизации задачи.	4
Создание, запись и чтение из файлов.	3
Создание циклов с условием и параметром.	3

### Методы решения задач гидродинамики вязкой жидкости

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

Показатели оценивания	Баллы
Численный эксперимент. Методы решения уравнений Навье-Стокса. Двухполевой метод.	9
Методы анализа устойчивости и сходимости разностных схем	8
Методы решения конечно-разностных уравнений. Скалярная прогонка.	7
Граничные условия для вихря и функции тока. Сходимость двухполевого метода. Тестовые задачи.	6

### Программные пакеты вычислительной гидродинамики

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

Показатели оценивания	Баллы
Современные программные пакеты и комплексы решения задач вычислительной гидродинамики.	9
Обзор профессиональных программных пакетов ANSYS Fluent, ANSYS CFX.	8
Обзор профессиональных программных пакетов OpenFOAM и др.	7
Метод конечных элементов, метод конечных объёмов.	6

### Примеры задач свободной конвекции в замкнутых объёмах

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставяемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **17**

Показатели оценивания	Баллы
Конвекция в прямоугольной полости при подогреве сбоку.	10
Надкритические режимы течения.	9
Устойчивость течений.	8
Течение в полости с подвижной верхней границей	7

Точные решения задач.	6