

**Утверждена**  
Ученым советом  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
протокол №14-22 от «10» ноября 2022 г.

# **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

## **УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ Вычислительный эксперимент**

### **Научные специальности:**

- 1.2.2. – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»,
- 1.1.6 - «Вычислительная математика»

### **Форма обучения**

очная

**Дисциплина:** «Вычислительный эксперимент»

**Научная специальность**

1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»,

1.1.6 – «Вычислительная математика»

**Форма обучения:** очная

**ИСПОЛНИТЕЛЬ** (разработчик программ):

Меньшов И.С., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н.

**РЕЦЕНЗЕНТ:** Луцкий Александр Евгеньевич, Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, доктор физико-математических наук, профессор

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА**

Ученым советом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

протокол № 14/22 от «10» ноября 2022 г.

Заведующий аспирантурой \_\_\_\_\_ / Меньшов И.С. /

## Оглавление

АННОТАЦИЯ .....	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....	4
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	5
<b>3.1. Структура дисциплины .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Содержание разделов дисциплины .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3. Семинарские занятия .....</b>	<b>7</b>
4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ .....	7
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	9
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	11

## АННОТАЦИЯ

Рабочая программа дисциплины «Вычислительный эксперимент» разработана и составлена на основании ФГТ - «Федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов)» (Приказ Минобрнауки № 951 от 20.10.2021г.), в соответствии с учебными планами подготовки аспирантов Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по научной специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Дисциплина «Вычислительный эксперимент» реализуется в рамках Блока «Образовательный компонент» основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научных и научно - педагогических кадров в аспирантуре ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

Основным источником материалов для формирования содержания программы являются: материалы конференций, симпозиумов, семинаров, Интернет-ресурсы, научные издания и монографические исследования и публикации.

Общая трудоемкость дисциплины по учебному плану составляет 4 зач.ед. (144 часов), из них лекций – 4 часа, семинарских занятий – 10 часов, практических занятий – 0 часов, самостоятельной работы – 94 часа и подготовка к экзамену - 36. Дисциплина реализуется на 2-м курсе, в 3-м семестре, продолжительность обучения – 1 семестр.

Текущая аттестация проводится не менее 2 раз в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренные настоящей программой.

Промежуточная оценка знания осуществляется в период зачетно-экзаменационной сессии в форме экзамена.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

#### Цели и задачи дисциплины «Вычислительный эксперимент»

**Цель:** освоение фундаментальных основ вычислительного эксперимента и численных методов, принципов разработки и построения комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем, исследование математических моделей физических, химических, биологических и других естественно-научных, а также социальных, экономических и технических объектов.

#### **Задачи: не менее 3**

- освоить основные принципы построения вычислительной модели;
- освоить основные методы математического моделирования и подходы к построению математических моделей;
- освоить реализацию численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Вычислительный эксперимент» направлен на получение определенных знаний, умений и формирования определенных компетенций:

- а) универсальные (УК):** не предусмотрено
- б) общепрофессиональных (ОПК):** не предусмотрено
- в) профессиональных (ПК):** Способность применять адекватные численные методы для решения вычислительной модели (ПК-2), Способность реализовывать методы и алгоритмы вычислительной модели в виде комплексов проблемно-ориентированных программ (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**Иметь представление:** Вычислительный эксперимент, основные понятия, определения, модель, моделирование. Основные этапы постановки и проведения вычислительного

эксперимента. Сферы применения вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент в физике и математике.

**Знать:** Знать основные понятия, результаты и задачи фундаментальной математики и механики. Знать основные и специальные разделы механики жидкостей, газа и плазмы и механики многофазных сред, качественные и количественные методы исследования механических систем, современные тенденции в разработке моделей механики.

**Уметь:** Уметь применять основные математические методы и алгоритмы для решения стандартных задач математики. Уметь физически корректно ставить задачи механики жидкостей газа и плазмы и механики многофазных сред, выбирать методы их анализа и решения, представлять и интерпретировать полученные результаты, давать качественные заключения о поведении сложных механических систем, анализировать протекающие процессы.

**Владеть:** Владеть методами математического моделирования и численными методами решения дискретных задач

**Приобрести опыт:** Проектирование и создание комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Структура дисциплины

##### Распределение трудоемкости дисциплины по видам учебных работ

Вид учебной работы	Трудоемкость					
	общая		из них			
	зач.ед.	час.	Лекц.	Прак.	Сем.	Сам.р.
<b>ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ по Учебному плану</b>	4	144	4	36	10	94
<i>Аудиторные занятия</i>		14				
Лекции (Л)		4				
Практические занятия (ПЗ) подготовка к экзамену		0				
Семинары (С)		10				
<i>Самостоятельная работа (СР) без учёта промежуточного контроля:</i>		94				
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		36				
<b>Вид контроля: экзамен</b>						

#### 3.2. Содержание разделов дисциплины

##### Общее содержание дисциплины

№ раздела	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)	Форма текущей аттестации
	Введение.		
	Основы вычислительного эксперимента	Основные понятия, определения, модель, моделирование, симуляция. Вычислительный эксперимент в физике и математике. Основные этапы постановки и проведения вычислительного эксперимента. Сферы применения вычислительного эксперимента. Инструментальные среды и пакеты прикладных программ для выполнения вычислительных экспериментов.	О, ДЗ

2.	Основы математического моделирования	Основные принципы математического моделирования. Понятие математической модели. Классификация математических моделей и методов моделирования. Адекватность математической модели. Понятие верификации и валидации математической модели.	О, ДЗ
3.	Разработка математических моделей	Основные подходы к разработке математических моделей. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Построение математических моделей на основе вариационных принципов. Методы построения и анализа дискретных моделей. Сходимость и устойчивость дискретной модели.	О, ДЗ

**Примечание:** О – опрос, Д – дискуссия (диспут, круглый стол, мозговой штурм, ролевая игра), ДЗ – домашнее задание (эссе и пр.). Формы контроля не являются жесткими и могут быть заменены преподавателем на другую форму контроля в зависимости от контингента обучающихся. Кроме того, на занятиях семинарских может проводиться работа с нормативными документами, изданиями средств информации и прочее, что также оценивается преподавателем.

### 3.3. Лекционные занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание Раздела (темы)	Кол-во часов
1.	1, 2	Вычислительный эксперимент: основные понятия, определения. Модель. Моделирование. Симуляция. Вычислительный эксперимент в физике и математике. Основные этапы постановки и проведения вычислительного эксперимента. Сферы применения вычислительного эксперимента. Основные понятия математического моделирования. Элементарные математические модели. Основные принципы математического моделирования. Понятие математической модели. Схематичное представление объекта моделирования. Система определяющих уравнений. Начальные данные и граничные условия. Динамические и статистические модели. Модели детерминированные и стохастические. Модели стационарные, квазистационарные и нестационарные Модели непрерывные и дискретные.	2
2.	3	Три подхода к разработке математических моделей: теоретический, эмпирический и комбинированный, три класса методов. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Построение математических моделей на основе вариационных принципов. Анализ дискретных моделей - сходимость и устойчивость.	2
ВСЕГО			4

### 3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание Раздела (темы)	Кол-во часов
3.	1	Математическое моделирование как основной инструмент вычислительного эксперимента. Основные понятия математического моделирования. Элементарные математические модели.	2
4.	2	Понятие математической модели. Схематичное представление объекта моделирования. Векторы входных координат, варьируемых параметров и выходных координат объекта. Вектор параметров математической модели. Система определяющих уравнений. Начальные данные и граничные условия.	2
5.	3	Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели молекулярной диффузии. Пример разработки математической модели теплопроводности (дифференциальное уравнение теплопроводности). Дифференциальное уравнение конвективного переноса тепла.	2
6.	3	Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели гидродинамики. Пример разработки математической модели деформируемого твердого тела. Построение математических моделей на основе вариационных принципов. Уравнения движения и законы сохранения. Примеры.	2
7.	1	Инструментальные среды и пакеты прикладных программ для выполнения вычислительных экспериментов.	2

#### 4. ТЕКУЩАЯ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

**Текущая аттестация аспирантов.** Текущая аттестация аспирантов проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН - Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине проводится в форме опроса, а также оценки вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных контрольных мероприятиях по оцениванию фактических результатов обучения, осуществляемых преподавателем, ведущим дисциплину. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины см. ниже.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина – активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- степень усвоения теоретических знаний и уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы, проводимых в рамках семинаров, практических занятий и самостоятельной работы.

Оценивание обучающегося на занятиях осуществляется с использованием нормативных оценок по 4-х бальной системе (5-отлично, 4-хорошо, 3-удовлетворительно, 2-не удовлетворительно).

##### Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Форма контроля знаний	Вид аттестации	Примечание
проверочные работы в течение всего курса	текущая	Ниже приведен перечень рекомендуемых контрольных вопросов
экзамен	итоговая	

Примерный перечень рекомендуемых контрольных вопросов для оценки **текущего** уровня успеваемости студента:

1. Вычислительный эксперимент: основные понятия, определения. Модель. Моделирование. Симуляция. Вычислительный эксперимент в физике и математике.
2. Основные этапы постановки и проведения вычислительного эксперимента.
3. Сферы применения вычислительного эксперимента. Ситуации, в которых вычислительный эксперимент может быть единственным инструментом исследования. Примеры.
4. Математическое моделирование как основной инструмент вычислительного эксперимента. Основные понятия математического моделирования. Элементарные математические модели.
5. Основные принципы математического моделирования. Принцип информационной достаточности. Принцип осуществимости. Принцип множественности моделей. Принцип агрегирования. Принцип параметризации.
6. Понятие математической модели. Схематичное представление объекта моделирования. Векторы входных координат, варьируемых параметров и выходных координат объекта. Вектор параметров математической модели. Система определяющих уравнений. Начальные данные и граничные условия.
7. Классификация математических моделей и методов моделирования. Динамические и статистические модели. Модели с распределенными и сосредоточенными параметрами. Модели детерминированные и стохастические. Модели стационарные, квазистационарные и нестационарные Модели непрерывные и дискретные.
8. Адекватность математической модели. Методы проверки адекватности модели. Понятие

верификации и валидации математической модели. Примеры.

9. Три подхода к разработке математических моделей: теоретический, эмпирический и комбинированный, три класса методов. Примеры разработки математических моделей с помощью этих подходов и сравнительный анализ, достоинства и недостатки.

10. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели молекулярной диффузии.

11. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели теплопроводности (дифференциальное уравнение теплопроводности). Дифференциальное уравнение конвективного переноса тепла.

12. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели гидродинамики.

Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели деформируемого твердого тела.

13. Построение математических моделей на основе вариационных принципов. Уравнения движения и законы сохранения. Примеры.

14. Инструментальные среды и пакеты прикладных программ для выполнения вычислительных экспериментов.

15. Методы построения и анализа дискретных моделей. Сходимость и устойчивость дискретной модели.

16. Модели биологических систем, описываемые одним дифференциальным уравнением. Модели роста популяции. Модель Мальтуса.

17. Классификация экономических моделей. Особенности применения метода математического моделирования в социально-экономических исследованиях.

**Итоговая аттестация аспирантов.** Промежуточная аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Итоговая аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена в период зачетно-экзаменационной сессии в соответствии с Графиком учебного процесса по приказу (распоряжению заместителю директора по научной работе). Обучающийся допускается к экзамену в случае выполнения аспирантом всех учебных заданий и мероприятий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценивание обучающегося на итоговой аттестации осуществляется с использованием нормативных оценок на экзамене – по 4-х бальной системы (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

#### **Оценивание аспиранта на промежуточной аттестации в форме экзамена**

Оценка	Требования к знаниям и критерии выставления оценок
2, неудовлетворительно	Отсутствие знаний
3, удовлетворительно	Общие, но не структурированные знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач
4, хорошо	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных
5, отлично	Сформированные систематические знания методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных

Список вопросов к экзамену.



1. Вычислительный эксперимент: основные понятия, определения.
2. Модель. Моделирование. Симуляция. Вычислительный эксперимент в физике и математике.
3. Основные этапы постановки и проведения вычислительного эксперимента.
4. Сферы применения вычислительного эксперимента. Ситуации, в которых вычислительный эксперимент может быть единственным инструментом исследования. Примеры.
5. Математическое моделирование как основной инструмент вычислительного эксперимента. Основные понятия математического моделирования. Элементарные математические модели.
6. Основные принципы математического моделирования. Принцип информационной достаточности. Принцип осуществимости. Принцип множественности моделей. Принцип агрегирования. Принцип параметризации.
7. Понятие математической модели. Схематичное представление объекта моделирования. Векторы входных координат, варьируемых параметров и выходных координат объекта. Вектор параметров математической модели. Система определяющих уравнений. Начальные данные и граничные условия.
8. Классификация математических моделей и методов моделирования. Динамические и статистические модели. Модели с распределенными и сосредоточенными параметрами. Модели детерминированные и стохастические. Модели стационарные, квазистационарные и нестационарные. Модели непрерывные и дискретные.
9. Адекватность математической модели. Методы проверки адекватности модели. Понятие верификации и валидации математической модели. Примеры.
10. Три подхода к разработке математических моделей: теоретический, эмпирический и комбинированный, три класса методов. Примеры разработки математических моделей с помощью этих подходов и сравнительный анализ, достоинства и недостатки.
11. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели молекулярной диффузии.
12. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели теплопроводности (дифференциальное уравнение теплопроводности). Дифференциальное уравнение конвективного переноса тепла.
13. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели гидродинамики.
14. Разработка математических моделей на основе законов сохранения. Пример разработки математической модели деформируемого твердого тела.
15. Построение математических моделей на основе вариационных принципов. Уравнения движения и законы сохранения. Примеры.
16. Инструментальные среды и пакеты прикладных программ для выполнения вычислительных экспериментов.
17. Методы построения и анализа дискретных моделей. Сходимость и устойчивость дискретной модели. Модели биологических систем, описываемые одним дифференциальным уравнением. Модели роста популяции. Модель Мальтуса.
18. Классификация экономических моделей. Особенности применения метода математического моделирования в социально-экономических исследованиях.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### *Основная литература*

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. - М.: Физматлит, 2012.
2. Самарский, А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М., Наука, 2011.

### *Дополнительная литература и Интернет-ресурсы*

1. Моисеев Н. Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1975.
2. К.Э. Плохотников. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент: методология и практика. [http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v13\(1-4\)/plokhotnikov-005-032.pdf](http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v13(1-4)/plokhotnikov-005-032.pdf)

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Для обеспечения интерактивных методов обучения для чтения лекций требуется аудитория с мультимедиа (возможен вариант с интерактивной доской).

Для проведения дискуссий и круглых столов, возможно, использование аудиторий со специальным расположением столов и стульев.

**ИСПОЛНИТЕЛИ** (разработчики программы):

Меньшов И.С., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н.