

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям

О.М. Здрок
«30» 2020 г.

Регистрационный № УД 285 /уч.



**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И АНАЛИЗА ДАННЫХ**

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 04 08 – Компьютерная физика

2020 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 08-2018, учебных планов №G31-220/уч. от 13.07.2018, №G31и-231/уч. от 20.03.2018.

СОСТАВИТЕЛЬ:

О.Г.Романов – заведующий кафедрой компьютерного моделирования Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТ:

С.В. Баханович – заместитель директора Института математики НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой компьютерного моделирования физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 16 от 25 мая 2020 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 12 от 25 июня 2020 г.).

Заведующий кафедрой
компьютерного моделирования
к.ф.-м.н., доцент

_____ О.Г. Романов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель данной учебной дисциплины – сформировать у студентов представление о месте и роли вычислительного эксперимента в инструментарии современной физики, его возможностях, методах и алгоритмах, а также развить навыки проведения вычислительных экспериментов в физике с использованием современных средств высокопроизводительной вычислительной техники.

Задачи учебной дисциплины:

1. Формирование знаний о концепциях, лежащих в основе проведения вычислительных экспериментов в различных областях науки и инженерии, месте численных методов в вычислительном эксперименте.
2. Подготовка обучаемых к численному решению задач из различных областей физики на современных высокопроизводительных ЭВМ.
3. Обучение разработке и реализации численного алгоритма для исследования сформулированной математической модели, созданию соответствующих компьютерных программ и использованию инструментов математических пакетов и систем компьютерной математики.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Технические, экологические, экономические и иные системы, изучаемые современной наукой, больше не поддаются исследованию (в нужной полноте и точности) обычными теоретическими методами. Прямой натуральный эксперимент над ними долог, дорог, часто либо опасен, либо попросту невозможен, так как многие из этих систем существуют в «единственном экземпляре». В то же время вычислительные (компьютерные, симуляционные, имитационные) эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на мощь современных вычислительных методов и технических инструментов информатики, подробно и глубоко изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам. Методология математического моделирования бурно развивается, охватывая все новые сферы – от разработки технических систем и управления ими до анализа сложнейших экономических и социальных процессов. Таким образом, знание теоретических основ, умение использовать методы вычислительного эксперимента, владение навыками решения физических задач с использованием высокопроизводительных компьютерных систем необходимы будущему физическому специалисту, специализирующемуся в области компьютерного моделирования физических процессов. Настоящая дисциплина призвана дать студентам соответствующие знания, умения и навыки.

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования и входит в модуль «Вычислительная физика-2».

Связи с другими учебными дисциплинами. Учебная дисциплина «Высокопроизводительные вычисления для моделирования физических процес-

сов и анализа данных» основана на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Математический анализ», «Дифференциальные и интегральные уравнения», «Методы математической физики», «Численные методы в физике», «Вычислительный эксперимент в физике».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Высокопроизводительные вычисления для моделирования физических процессов и анализа данных» должно обеспечить формирование следующей **специализированной** компетенции:

СК-8. Быть способным разрабатывать физико-математическую модель исследуемого явления, уметь моделировать на компьютере физические процессы различной природы.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- общие принципы построения математических явлений и проведения компьютерного эксперимента;
- методы численного решения задач математической физики;
- методы моделирования случайных величин и процессов;
- методы статистического анализа результатов стохастического эксперимента;

уметь:

- разрабатывать математические детерминированные и стохастические модели физических явлений;
- реализовывать математические модели в различных средах программирования;
- проводить компьютерный эксперимент и обрабатывать его результаты;

владеть

- навыками построения детерминированных и стохастических моделей;
- навыками проведения компьютерного эксперимента и анализа его результатов;
- навыками оценивания качества и эффективности построенных численных моделей физических систем, их усовершенствования на основе полученных данных.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 6 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Высокопроизводительные вычисления для моделирования физических процессов и анализа данных» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 108 часов, в том числе 60 аудиторных часа, из них: лекции – 54 часов, управляемая самостоятельная работа – 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Формы текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1. Общие принципы компьютерного моделирования физических процессов.

Основные этапы проведения компьютерного эксперимента: схема Самарского: «модель-алгоритм-программа». Физическая постановка задачи. Построение математической модели. Разработка численного метода. Разработка алгоритма решения задачи. Программирование. Отладка программы. Проведение расчетов. Анализ результатов. Экономичность способа решения задачи. Элементарные математические модели. Примеры моделей, получаемых из фундаментальных законов природы. Модели простейших нелинейных явлений. Основные методы построения и анализа разностных схем. Аппроксимация производных. Погрешность аппроксимации. Построение разностных схем. Сходимость. Аппроксимация. Устойчивость. Метод конечных элементов.

Тема 2. Модели физических процессов на основе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Физические законы, выражающиеся обыкновенными дифференциальными уравнениями: законы динамики Ньютона, первый закон термодинамики, уравнения теплового баланса. Понятие о колебательных системах. Свободные и затухающие колебания, вынужденные колебания, резонанс, эффекты нелинейности. Моделирование колебательных систем. Основные положения метода молекулярной динамики. Алгоритм моделирования методом молекулярной динамики.

Тема 3. Модели физических процессов в распределенных системах на основе уравнений в частных производных.

Физические законы, формулирующиеся на основе уравнений в частных производных. Стационарные поля и их описание – уравнения эллиптического типа, постановка задачи. Описание электростатических полей. Практическая реализация численной и компьютерной моделей. Процессы релаксации. Уравнения параболического типа. Процессы распространения тепла, диффузия. Практическая реализация численной и компьютерной моделей. Распространение малых колебаний и возмущений. Уравнения гиперболического типа. Практическая реализация численной и компьютерной моделей.

Тема 4. Элементы вычислительной гидродинамики.

Уравнения движения сплошных сред. Уравнения Эйлера. Уравнения Лагранжа. Одномерное движение сжимаемой жидкости (газа). Конечноразностные уравнения. Практическая реализация численной и компьютерной моделей. Моделирование распространения ударных волн. Движение несжимаемой жидкости (газа). Уравнения Навье-Стокса. Решение уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости в переменных «вихрь»-«функция тока». Практическая реализация численной и компьютерной моделей. Моделирование конвекции Рэля-Бенара. Моделирование неустойчивости Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца. Применение высокопроизводительных вычислений в физике атмосферы.

Тема 5. Элементы вычислительной электродинамики.

Уравнения Максвелла. Метод конечноразностной аппроксимации во временной области (FDTD-метод). Практическая реализация численной и компьютерной моделей. Моделирование явлений дифракции, интерференции, отражения и преломления электромагнитных волн. Моделирование распространения сверхкоротких электромагнитных импульсов. Применения FDTD-метода в задачах нанопотоники. Распространение электромагнитных импульсов в метаматериалах.

Тема 6. Моделирование квантовых систем.

Стационарное уравнение Шредингера. Нестационарное уравнение Шредингера. Отражение и туннелирование квантовых волновых пакетов через потенциальные барьеры. Практическая реализация численной и компьютерной моделей.

Тема 7. Моделирование мультифизических задач.

Моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Распространение лазерного излучения в поглощающих и рассеивающих средах. Моделирование теплового и термомеханического действие лазерного излучения. Моделирование плавления металлов и развития гидродинамических неустойчивостей в расплаве.

Тема 8. Современное программное обеспечение для моделирования физических процессов, решения инженерных задач и анализа данных.

Основные положения метода конечных элементов для решения задач математической физики. Обзор современных программ конечно-элементного анализа: ANSYS, Comsol Multiphysics, OpenFOAM и др. Пакет прикладных программ HyperChem, предназначенный для решения задач молекулярной динамики, механики и квантовой химии. Прикладные пакеты для математических вычислений и анализа данных: Maple, Mathematica, MATLAB и др.

Тема 9. Принципы реализации высокопроизводительных расчетов с использованием современных вычислительных систем.

Параллельные вычислительные системы. Архитектура и технологии параллельного программирования. Вычислительные системы с распределенной памятью. Вычислительные системы с общей памятью. Парадигма программирования с технологией MPI. Технология OpenMP. Вычислительные системы на GPU. Технология CUDA.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов		Формы контроля знаний
		Лекции	УСР	
1	2	3	4	5
1	Общие принципы компьютерного моделирования физических процессов	6		Устный опрос
2	Модели физических процессов на основе обыкновенных дифференциальных уравнений.	6	2	Устный опрос Письменный отчет
3	Модели физических процессов в распределенных системах на основе уравнений в частных производных	8		Устный опрос
4	Элементы вычислительной гидродинамики	8		Устный опрос
5	Элементы вычислительной электродинамики	6		Устный опрос Контрольная работа по темам 1-5
6	Моделирование квантовых систем	6	2	Письменный отчет
7	Моделирование мультифизических задач	6	2	Письменный отчет
8	Современное программное обеспечение для моделирования физических процессов, решения инженерных задач и анализа данных	4		Устный опрос
9	Принципы реализации высокопроизводительных расчетов с использованием современных вычислительных систем	4		Устный опрос
	Всего	54	6	Экзамен

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Landau, Rubin H.; Páez, Manuel J.; Bordeianu, Cristian C. Computational Physics: Problem Solving with Python. 2015. – 644p.
2. Hoffman, J. D. Numerical methods for engineers and scientists / J. D. Hoffman. - Marcel Dekker, Inc., NY, 2001. – 823 p.
3. Ильин В.П. Математическое моделирование. Часть 1. Непрерывные и дискретные модели / В. П. Ильин. - Новосибирск: Изд-во Сиб. Отделения РАН, 2017. 2017. - 428 с.
4. Самарский, А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. - Москва: Наука. Физматлит, 2001. - 320 с.
5. Тихонов, Н. А. Основы математического моделирования: учебное пособие. Части 1-2 // Н. А. Тихонов, М. Г. Токмачев. - Москва: Физический факультет МГУ, 2013. - 175 с.
6. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. - М.: Высшая школа, 2002. - 840 с.
7. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. - М.: Мир, 1977. - 612 с.
8. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. – 392 с.
9. Кудряшов, Н. А. Методы нелинейной математической физики: Учебное пособие / Н. А. Кудряшов — М.: МИФИ, 2008. — 352 с.
10. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
11. Press, W. H. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing / W. H/ Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. - Cambridge University Press, Cambridge, 2007. - 125 p.
12. Pinder G. F. Numerical Methods for Solving Partial Differential Equations. John Wiley and Sons, Inc., USA, 2018, 296 p.

Перечень дополнительной литературы

1. Г. Гулд, Д.Тоболчник. Компьютерное моделирование в физике. М.: Мир. 1990г., Т.1,2. – 400 с.
2. Мышкис, А. Д. Элементы теории математических моделей / А. Д. Мышкис. - Москва: КомКнига, 2007. – 192 с.
3. Каханер, Д. Численные методы и программирование / Каханер, К. Моулер, С. Нэш С. - М.: Мир, 1998.
4. James E. Gentle J. E. Matrix algebra. Theory, Computations, and Applications in Statistics, Springer Science+Business Media, LLC, NY, 2007. - 528p.
5. Зализняк В.Е. Основы вычислительной физики: учебное пособие для студ. вузов. М.: Техносфера, 2008. - 224с.
6. Taflove, A. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-

- Domain Method / A. Taflove, S.C. Hagness. – Norwood, MA: Artech, 2000. – 852 p.
7. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея – Бенара. Структура и динамика. – М.: Эдиаториал УРСС, 1999. – 247 с.
8. Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. С77 Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 252 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для диагностики компетенций и текущего контроля качества усвоения знаний по данной дисциплине рекомендуется использовать устные вопросы по изучаемым темам дисциплины, отчеты по управляемой самостоятельно работе, контрольные работы и решение задач. Все контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. При неявке на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Студенты, получившие неудовлетворительные оценки, либо не явившиеся на контрольные мероприятия без уважительных причин, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой, могут быть допущены к повторному контрольному мероприятию. Удовлетворительные оценки по контрольным мероприятиям и отчетам по УСР является необходимым условием для допуска к экзамену.

Контрольная работа проводится в письменной форме. На выполнение контрольной работы отводится 45 мин.

Отчеты по результатам УСР сдаются преподавателю одним из следующих способов: (i) на электронном носителе, (ii) высылаются студентом по электронной почте, (iii) загружаются студентом в соответствующий курс на образовательном портале физического факультета (eduphys.bsu.by).

Оценка всех форм текущего контроля проводится по десятибалльной шкале.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Высокопроизводительные вычисления для моделирования физических процессов и анализа данных» учебным планом предусмотрен экзамен.

Итоговая оценка по дисциплине формируется на основе рейтинговой системы оценивания знаний студента, что позволяет оценивать в процессе изучения дисциплины динамику процесса достижения целей обучения и успешность прохождения каждого из этапов. Рейтинговая оценка строится на основе весовых вкладов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

Примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний и текущей аттестации в рейтинговую оценку, следующие. Формирование оценки за текущую успеваемость:

контрольная работа – 50 %;

письменные отчеты – 50 %.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценка по текущей успеваемости составляет 50 %, экзаменационная оценка - 50 %.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Тема 2. Модели физических процессов на основе обыкновенных дифференциальных уравнений.

1. Изучить теоретический материал по темам: Понятие о колебательных системах. Свободные и затухающие колебания, вынужденные колебания, резонанс, эффекты нелинейности. Моделирование колебательных систем.
2. С помощью компьютерной программы «Modeling of oscillations.exe» провести моделирование следующих режимов колебательной системы: свободные колебания (гармонические, затухающие); вынужденные колебания (исследовать зависимость от частоты движущей силы, получить биения и резонансные режимы без затухания и с затуханием, сравнить результаты); нелинейные колебания (исследовать зависимость частоты колебаний от амплитуды) для случаев квадратичной и кубической нелинейности.
3. Получить типичные временные зависимости, фазовые портреты и спектры Фурье.

Форма контроля – письменный отчет.

Тема 6. Моделирование квантовых систем.

1. Изучить теоретический материал по темам: Нестационарное уравнение Шредингера. Отражение и туннелирование квантовых волновых пакетов через потенциальные барьеры.
2. Используя программу-симулятор «1D tunneling.exe», провести вычислительные эксперименты для моделирования распространения волнового пакета через потенциальный барьер.
3. Исследовать и построить зависимость коэффициента пропускания от энергии (для разных значений толщины барьера).

Форма контроля – письменный отчет.

Тема 7. Моделирование мультифизических задач.

1. Изучить теоретический материал по темам: Моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Моделирование теплового и термомеханического действия лазерного излучения. Одномерное движение (уравнения движения в форме Лагранжа).
2. С помощью программы-симулятора «Lagrange 1D.exe» провести вычислительные эксперименты по моделированию возбуждения акустических

сигналов при воздействии импульсного лазерного излучения на поглощающую среду.

3. Исследовать и построить график зависимости амплитуды акустического сигнала в положительной и отрицательной фазах от длительности лазерного импульса при постоянной объемной плотности выделения энергии в среде (для двух различных значений коэффициента поглощения).

4. При заданном коэффициенте поглощения среды и длительности импульса, увеличивая интенсивность, получить и исследовать режим возбуждения ударной волны, определить скорость распространения ее фронта в зависимости от интенсивности лазерного импульса.

Форма контроля – письменный отчет.

Отчеты с выполненными заданиями загружаются студентом в соответствующий курс на образовательном портале БГУ (eduphys.bsu.by) либо высылаются преподавателю по электронной почте.

Примерный перечень тем контрольной работы

1. Конечно-разностные аппроксимации производных. Погрешность аппроксимации. Построение разностных схем. Явные и неявные схемы. Двухслойные и трехслойные схемы. Устойчивость разностных схем.

2. Стационарные поля и их описание – уравнения эллиптического типа, постановка задачи. Описание электростатических полей.

3. Уравнения параболического типа. Процессы распространения тепла, диффузия.

4. Распространение малых колебаний и возмущений. Уравнения гиперболического типа.

5. Уравнения движения сплошных сред. Уравнения Эйлера. Уравнения Лагранжа. Одномерное движение сжимаемой жидкости (газа).

6. Уравнения Максвелла. Метод конечноразностной аппроксимации во временной области (FDTD-метод).

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса рекомендуется использовать следующие инновационные подходы и методы:

1. **Практико-ориентированный подход**, который предполагает освоение содержания образования через решения практических задач, которые способствуют формированию основ дальнейшей профессиональной деятельности.

2. **Развитие критического мышления**: формирование навыков работы с информацией в процессе чтения и письма; понимания информации как отправного, а не конечного пункта критического мышления.

3. **Метод проектного обучения**, который предполагает развитие актуальных для учебной и профессиональной деятельности навыков планирования, самоорганизации, сотрудничества, решения открытых исследовательских задач.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов

Основой организации самостоятельной работы студентов является предоставление студентам необходимой для работы информации, а также обеспечение регулярных консультаций преподавателя и периодичной отчетности по различным видам учебной и самостоятельной деятельности.

В открытом доступе для студентов размещается следующая информация:

- программа курса с указанием основной и дополнительной литературы;
- учебно-методические материалы;
- график консультаций преподавателя;
- вопросы для проведения экзамена;
- сроки проведения контрольных мероприятий по различным видам учебной деятельности.

Самостоятельная работа студентов предполагает проработку литературы согласно рекомендациям преподавателя, самостоятельный поиск информации в бумажных и электронных источниках, расширение конспекта лекций по результатам данной проработки, изучение и модификацию компьютерных программ-примеров реализаций сложных алгоритмов, выполнение и защиту домашних заданий. Самостоятельную работу студентов следует организовывать на основе принципов системности и регулярности. В помощь студентам рекомендуется разрабатывать и совершенствовать дистанционный курс на образовательном портале физического факультета.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Основные этапы проведения вычислительного эксперимента. Схема Самарского: «модель-алгоритм-программа».
2. Конечно-разностные аппроксимации производных. Погрешность аппроксимации.
3. Построение разностных схем. Явные и неявные схемы. Двухслойные и трехслойные схемы.
4. Устойчивость разностных схем.
5. Метод конечных элементов.
6. Физические законы, выражающиеся обыкновенными дифференциальными уравнениями.
7. Методы обработки результатов физических экспериментов
8. Понятие о колебательных системах. Свободные и затухающие колебания, вынужденные колебания, резонанс.

9. Эффекты нелинейности в колебательных системах: удвоение частоты, нелинейные резонансы.
10. Алгоритм моделирования методом молекулярной динамики. Моделирование многочастичных систем методом молекулярной динамики.
11. Классификация физических моделей и соответствующих им дифференциальных уравнений.
12. Требования к численным методам решения ОДУ. Стратегия выбора характерных временных, пространственных и энергетических единиц измерения моделей.
13. Процедура исследования устойчивости, согласованности и сходимости конечно-разностных уравнений.
14. Стационарные поля и их описание. Уравнения эллиптического типа.
15. Уравнения параболического типа. Процессы распространения тепла, диффузия.
16. Уравнение переноса.
17. Распространение малых колебаний и возмущений. Уравнения гиперболического типа.
18. Исследование согласованности, устойчивости, сходимости конечно-разностного метода решения УЧП. Анализ свойств метода из критерия устойчивости фон Н്യюмена.
19. Методы решения УЧП параболического типа на примере задач диффузии.
20. Методы решения одномерных и двумерных УЧП эллиптического типа.
21. Модель адвекция-диффузия. Явные и неявные схемы.
22. Методы решения одномерного и двумерного волнового уравнения.
23. Методы решения уравнения переноса: явная схема, схема Лакса, условие Куранта-Фридриха-Леви и его физическая интерпретация, схема Лакса-Вендроффа, предиктор-корректорные схемы.
24. Движение сжимаемой жидкости (газа). Уравнения Эйлера. Уравнения Лагранжа.
25. Конечно-разностные аппроксимации уравнений движения в форме Эйлера.
26. Конечно-разностные аппроксимации уравнений движения в форме Лагранжа.
27. Численное решение уравнений Лагранжа для моделирования распространения ударных волн.
28. Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Методы решения уравнений движения в переменных «вихрь-функция тока».
29. Моделирование конвекции Рэля-Бенара в приближении Буссинеска.
30. Моделирование неустойчивостей Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца.
31. Уравнения Максвелла. Методы численного решения.

32. Конечноразностная аппроксимация уравнений Максвелла во временной области (FDTD-метод).
33. Моделирование процессов распространения сверхкоротких лазерных импульсов в линейных и нелинейных средах.
34. Моделирование распространения электромагнитного излучения в метаматериалах.
35. Моделирование распространения электромагнитного излучения в фотонных кристаллах.
36. «Тепловой» и «гидродинамический» механизмы разрушения металлов при умеренных плотностях потока излучения. Принципы моделирования тепловых и гидродинамических задач.
37. Моделирование процессов воздействия лазерного излучения на полимерные материалы.
38. Моделирование теплового и термомеханического действия лазерного излучения на биоткани.
39. Моделирование квантовых явлений.
40. Основные положения метода конечных элементов для решения задач математической физики.
41. Применение пакета Comsol Multiphysics для решения мультифизических задач.
42. Архитектура и технологии параллельного программирования. Вычислительные системы с распределенной памятью.
43. Архитектура и технологии параллельного программирования. Вычислительные системы с общей памятью.
44. Парадигма программирования с технологией MPI.
45. Вычислительные системы на GPU. Технология CUDA.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название Кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Численные методы	Кафедра компьютерного моделирования	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол №16 от 25.05.2020)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на 202_/202_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
компьютерного моделирования
(протокол № ____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой
компьютерного моделирования
к.ф.-м.н., доцент

_____ О.Г. Романов

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета БГУ
к.ф.-м.н., доцент

_____ М.С. Тиванов