

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям

«30» _____ 2020 г.
О.Н. Здрок

Регистрационный № УД- 9474 /уч

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В
ГИДРО- И ГАЗОДИНАМИКЕ**

**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 08-2013, учебного плана №G31-216/уч. от 20.02.2018 г.

СОСТАВИТЕЛЬ:

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

РЕЦЕНЗЕНТ:

С.И. Максимов – заведующий кафедрой информационных технологий в образовании Государственного учреждения образования «Республиканский институт высшей школы», кандидат технических наук, доцент.

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 учебной дисциплины – сформировать у студентов представление о роли математического моделирования в исследовании гидродинамических и аэродинамических явлений, а также развить навыки применения методов математического моделирования в физике атмосферы и гидродинамике с использованием современных средств вычислительной техники.

Задачи учебной дисциплины – дать основные сведения о метеорологических и гидрологических явлениях, на конкретных примерах научить студентов применять знания, полученные в процессе изучения общефизических курсов, к физическому и математическому моделированию процессов в атмосфере и гидросфере, научить применять методы численного моделирования при решении задач гидро- и аэродинамики.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования.

Методология математического моделирования бурно развивается в настоящее время, охватывая все новые сферы – от разработки технических систем и управления ими до анализа сложнейших экономических и социальных процессов. Особенно плодотворным такой метод исследования оказывается в гидро- и аэродинамике, позволяя решать такие сложные задачи, как составления прогноза погоды, разработка моделей летательных аппаратов, исследование циркуляции мирового океана и др. Знание теоретических основ, умение использовать методы вычислительного эксперимента, владение навыками решения физических задач с использованием современных вычислительных систем необходимы будущему физическому специалисту, специализирующемуся в области компьютерного моделирования физических процессов. Настоящая дисциплина призвана дать студентам основные знания и умения, которыми должны владеть студенты для проведения вычислительного эксперимента в области гидро- и аэродинамики, анализа и интерпретации его данных.

Связи с другими учебными дисциплинами. Учебная дисциплина «Математическое моделирование в гидро- и газодинамике» основана на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Математический анализ», «Дифференциальные и интегральные уравнения», «Методы математической физики», «Теоретическая механика», «Численные методы», «Вычислительный эксперимент».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Математическое моделирование в гидро- и газодинамике» должно обеспечить формирование следующих академических и профессиональных компетенций:

Академические компетенции:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

Профессиональные компетенции:

ПК-6. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы.

ПК-7. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационно-образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

знать:

– физическую природу атмосферных и гидрологических явлений и процессов;

– основные процессы, приводящие к движению жидкостей и газов и физические и математические модели, применяемые для исследования этих процессов;

– взаимодействие действующих сил в атмосфере и преобразование энергии в циркуляционных ячейках различного масштаба;

уметь:

– выявлять обратимые и необратимые процессы в сплошной среде, их взаимодействия;

– разрабатывать физико-математические и численные модели, описывающие типичные атмосферные и гидрологические явления;

– применять основные программные продукты по моделированию атмосферных процессов для анализа и прогнозирования в различных временных масштабах;

владеть:

– навыками применения различных форм уравнений движения для математического моделирования процессов в сплошных средах;

– навыками построения численных схем для решения уравнений движения сплошных сред.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 8 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Математическое моделирование в гидро- и газодинамике» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 160 часов, в том числе 68 аудиторных часа, из них: лекции – 54 часа, управляемая самостоятельная работа – 14 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 4,5 зачетные единицы.

Формы текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1. Кинематика жидкой среды.

Уравнение неразрывности. Переменные Лагранжа. Переменные Эйлера. Переход от переменных Лагранжа к переменным Эйлера. Поле скоростей. Уравнение неразрывности и переменных Лагранжа и Эйлера. Потенциал скорости. Свойства безвихревого движения в односвязном объеме. Вихревое поле и его свойства.

Тема 2. Основные уравнения динамики идеальной жидкости.

Силы массовые и поверхностные. Общее уравнение движения. Гидродинамическое давление в идеальной жидкости. Общие уравнения движения идеальной жидкости. Уравнения движения в форме Эйлера. Векторные формы уравнений движения. Уравнения движения в форме Ламба. Уравнения движения в форме Лагранжа. Общая постановка задач гидродинамики. Случай несжимаемой жидкости. Случай сжимаемой жидкости. Баротропность и бароклинность. Уравнение притока энергии. Начальные и граничные условия. Применение закона количества движения и закона моментов количества движения.

Тема 3. Гидростатика.

Гидростатическое давление. Уравнение равновесия. Барометрическая формула. Закон Архимеда. Равновесие плавающих тел. Условия равновесия плавающего тела.

Тема 4. Простейшие случаи движения идеальной жидкости.

Установившееся течение. Безвихревое течение. Формула Торричелли. Плоское безвихревое течение. Функция тока. Связь функции тока с потенциалом скорости. Связь плоской гидродинамической задачи с теорией функций комплексного переменного.

Тема 5. Вихревые движения идеальной жидкости.

Основные уравнения теории вихрей и теоремы Гельмгольца о сохранении вихрей. Образование вихрей. Теорема В.Бьеркнеса. Примеры образования вихрей. Определение поля скорости по заданному полю вихрей и полю расхождения скорости. Вихревые цепочки Кармана. Плоская задача о движении тела в идеальной жидкости. Пространственная задача о движении тела в идеальной жидкости.

Тема 6. Волновые движения идеальной жидкости.

Основные уравнения теории волн. Волновые при конечной глубине жидкости. Волны на поверхности раздела двух жидкостей. Волны в сжимаемой жидкости. Обтекание воздухом горного хребта. Корабельные волны. Колебания жидкости в прямоугольном сосуде и в круговом цилиндре. Длинные волны. Основные уравнения. Теория приливов. Волны во вращающейся атмосферной оболочке. Длинные волны конечной амплитуды. Волны на мелкой воде. Разрушение плотины. Обтекание препятствия тяжелой сжимаемой жидкостью.

Тема 7. Теоретические основы газовой динамики.

Математическая модель газовой динамики. Уравнения газовой динамики в интегральной и дифференциальной формах. Гиперболичность системы одномерных нестационарных уравнений газовой динамики. Разрывные решения. Структура фронта ударной волны. Распад произвольного разрыва.

Тема 8. Движение вязкой жидкости.

Основные уравнения движения вязкой жидкости. Точные решения уравнений движения вязкой жидкости. Приближенные решения уравнений движения вязкой жидкости в случае малых чисел Рейнольдса. Приближенные решения уравнений движения вязкой жидкости в случае больших чисел Рейнольдса. Элементы теории турбулентности.

Тема 9. Основы физики атмосферы.

Режимы движения атмосферы. Баланс сил в общем случае. Сила Кориолиса. Уравнение погоды. Термодинамика атмосферы. Первое начало термодинамики применительно к атмосфере. Уравнения Пуассона. Устойчивость. Потенциальная температура. Термодинамические графики. Устойчивость слоя. Радиационные процессы в атмосфере. Солнце и солнечная постоянная. Ослабление солнечной радиации в атмосфере. Альбедо. Излучение земной поверхности. Парниковый эффект. Радиационный баланс. Обмен энергией между водоемом и атмосферой. Термодинамические свойства воды. Механизм испарения, конденсации, возгонки и сублимации с точки зрения термодинамики и молекулярно-кинетической теории. Особенности энергообмена на границе вода – атмосфера. Испарение. Турбулентный теплообмен на границе поверхности. Уравнение Навье – Стокса в приближении Буссинеска. Конвективный теплоперенос в поверхностном слое водоема и его роль в установлении гидрологического режима. Виды конвективных ячеек. Глобальная циркуляция. Масштабы метеорологических явлений. Ячейки циркуляции. Циклоны и антициклоны. Стационарные фронты. Циркуляция стратосферы. Струйные течения. Полярный вихрь.

Тема 10. Уравнения движения несжимаемой жидкости в декартовой системе координат.

Уравнения движения для физических переменных. Уравнения переноса вихря и уравнение для функции тока в случае плоских движений. Консервативная форма уравнений. Уравнения в безразмерных переменных. Одномерные модельные уравнения переноса.

Тема 11. Уравнения движения сжимаемой жидкости в декартовой системе координат.

Традиционная форма уравнений. Консервативная форма уравнений. Дополнительные соотношения. Безразмерный вид консервативных уравнений. Физические и математические особенности, связанные с наличием ударных волн.

Тема 12. Численные методы расчета движений несжимаемой жидкости.

Методы решения уравнения переноса вихря. Методы решения уравнений для функции тока. Граничные условия для уравнений переноса вихря и уравнения для функции тока. Критерии сходимости и начальные условия.

Расчет давления. Расчет температуры и концентрации. Методы решения уравнений для простейших физических переменных. Трехмерные течения.

Тема 13. Схемы расчета движений сжимаемой жидкости.

Методы расчета течений без ударных волн и методы с выделением ударных волн. Методы численного расчета ударных волн. Размазывание скачков при помощи искусственной диссипации. Схемы с явной искусственной вязкостью (схемы фон Неймана-Рихтмайера, Ландсхофа и Лонгли, Русанова). Схемы с неявной искусственной вязкостью (схемы с разностями против потока, метод частиц в ячейках и метод жидкости в ячейках, схема Лакса, схемы Лакса-Вендроффа). Вязкость в уравнениях течения сжимаемой жидкости. Граничные условия для течений сжимаемой жидкости.

Тема 14. Численные методы газовой динамики.

Основные понятия теории разностных схем. Анализ частных схем газовой динамики. Понятие консервативности схемы. Полностью консервативные разностные схемы. Понятие устойчивости разностной схемы. Устойчивость разностных схем для уравнения переноса. Влияние вязкости на устойчивость разностных схем. Реализация разностных схем газовой динамики. Явные методы. Метод Ньютона. Метод прогонки. Применение метода Ньютона к решению разностных уравнений газовой динамики. Метод отдельных прогонок. Полностью консервативные разностные схемы для двумерных уравнений газовой динамики. Уравнения движения в лагранжевых переменных. Полностью консервативная разностная схема для двумерных задач газовой динамики

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер темы	Название раздела, темы	Количество ауди- торных часов	Количество часов УСР	Формы контроля Знаний
		Лек- ции		
1	2	3	4	5
1	Кинематика жидкой среды	2		Устный опрос
2	Основные уравнения динамики идеальной жидкости	4		Устный опрос
3	Гидростатика	2		Устный опрос
4	Простейшие случаи движения идеальной жидкости	2		Устный опрос
5	Вихревые движения идеальной жидкости	2		Устный опрос
6	Волновые движения идеальной жидкости	4		Устный опрос
7	Теоретические основы газовой динамики	4		Устный опрос
8	Движение вязкой жидкости	4		Устный опрос Контрольная работа по темам 1-8
9	Основы физики атмосферы	8	6	Устный опрос Реферат
10	Уравнения движения несжимаемой жидкости в декартовой системе координат	2		Устный опрос
11	Уравнения движения сжимаемой жидкости в декартовой системе координат	2		Устный опрос

12	Численные методы расчета движений несжимаемой жидкости	6	4	Устный опрос Письменный отчет
13	Схемы расчета движений сжимаемой жидкости	6	4	Устный опрос Письменный отчет
14	Численные методы газовой динамики	6		Устный опрос
	Всего	54	14	Экзамен

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Тихонов, Н. А. Основы математического моделирования: учебное пособие. Части 1-2 // Н. А. Тихонов, М. Г. Токмачев. - Москва: Физический факультет МГУ, 2013. - 175 с.
2. Самарский, А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. - Москва: Наука. Физматлит, 2001. - 320 с.
3. Sharma A. Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis. 2016. – 300p.
4. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. - М.: Высшая школа, 2002. - 840 с.
5. Темам Р., Миранвиль А. Математическое моделирование в механике сплошных сред. М.:Бином, 2013.
6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. - М.: Мир, 1977. - 612 с.
7. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. – 392 с.
8. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физ-мат. лит., 1963.
9. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика. М.: РХД, 2002.
10. Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т., Юдин М.И.. Основы динамической метеорологии. Гидрометеиздат, Ленинград, 1984. – 642с.
11. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. 2006.
12. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана, 1974.
13. Рихтмайер, К.Мортон. Разностные методы решения краевых задач. М.:Мир, 1972.
14. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.

Перечень дополнительной литературы

1. Обухов, А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. / А.М. Обухов — Л.: Гидрометеиздат, 1984.
2. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея – Бенара. Структура и динамика. – М.: Эдиаториал УРСС, 1999. – 247 с.
3. 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 опросы по изучаемым темам дисциплины, письменные отчеты по управляемой самостоятельно работе, контрольную работу. 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 являются необходимым условием для допуска к экзамену.

Контрольная работа проводится в письменной форме. На выполнение контрольной работы отводится 90 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 «Математическое моделирование в гидро- и газодинамике» 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 – 30 %;

письменные отчеты – 30 %;

реферат – 30%;

устный опрос – 10%.

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 9. Основы физики атмосферы.

1. Изучить теоретический материал по одной из тем реферативных работ из примерного перечня.
 2. Подготовить письменный реферат.
- Форма контроля – письменный реферат.

Тема 12. Численные методы расчета движений несжимаемой жидкости.

1. Изучить теоретический материал по теме: Методы решения уравнения переноса вихря. Методы решения уравнений для функции тока. Граничные условия для уравнений переноса вихря и уравнения для функции тока.
 2. Используя программу-симулятор «2D Karman.exe», провести вычислительные эксперименты для моделирования процессов обтекания препятствия потоком вязкой несжимаемой жидкости.
 3. Исследовать и построить картины течений для различных чисел Рейнольдса.
- Форма контроля – письменный отчет.

Тема 13. Схемы расчета движений сжимаемой жидкости.

1. Изучить теоретический материал по теме: Методы численного расчета ударных волн. Размазывание скачков при помощи искусственной диссипации.
 2. С помощью программы-симулятора «Lagrange 1D.exe» провести вычислительные эксперименты по моделированию возбуждения ударных волн 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 реферативных работ

1. Уравнение погоды.
2. Радиационные процессы в атмосфере.

3. Парниковый эффект.
4. Глобальная циркуляция атмосферы.
5. Ячейки глобальной циркуляции атмосферы.
6. Циклоны и антициклоны.
7. Циркуляция стратосферы.
8. Струйные течения.
9. Полярный вихрь.
10. Атмосферные фронты.

Примерный перечень тем контрольной работы

1. Уравнения движения идеальной жидкости.
2. Течение идеальной жидкости.
3. Уравнения теории волн.
4. Уравнения газовой динамики.
5. Уравнения движения вязкой жидкости

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. Уравнение неразрывности. Переменные Лагранжа. Переменные Эйлера. Переход от переменных Лагранжа к переменным Эйлера.
2. Поле скоростей. Уравнение неразрывности и переменных Лагранжа и Эйлера. Потенциал скорости. Свойства безвихревого движения в односвязном объеме. Вихревое поле и его свойства.
3. Общее уравнение движения. Гидродинамическое давление в идеальной жидкости.
4. Общие уравнения движения идеальной жидкости. Уравнения движения в форме Эйлера.
5. Уравнения движения в форме Ламба. Уравнения движения в форме Лагранжа. Случай несжимаемой жидкости. Случай сжимаемой жидкости.
6. Уравнение притока энергии.
7. Гидростатическое давление. Уравнение равновесия. Барометрическая формула. Закон Архимеда. Равновесие плавающих тел.
8. Простейшие случаи движения идеальной жидкости. Установившееся течение. Безвихревое течение. Формула Торричелли. Плоское безвихревое течение.
9. Функция тока. Связь функции тока с потенциалом скорости. Связь плоской гидродинамической задачи с теорией функций комплексного переменного.
10. Основные уравнения теории вихрей и теоремы Гельмгольца о сохранении вихрей. Образование вихрей. Теорема В.Бьеркнеса. Примеры образования вихрей.
11. Вихревые цепочки Кармана. Плоская задача о движении тела в идеальной жидкости. Пространственная задача о движении тела в идеальной жидкости.
12. Основные уравнения теории волн.
13. Волновые при конечной глубине жидкости. Волны на поверхности раздела двух жидкостей.

14. Волны в сжимаемой жидкости.
15. Обтекание воздухом горного хребта. Корабельные волны.
16. Теория приливов. Волны во вращающейся атмосферной оболочке.
17. Длинные волны конечной амплитуды. Волны на мелкой воде.
18. Математическая модель газовой динамики. Уравнения газовой динамики в интегральной и дифференциальной формах.
19. Гиперболичность системы одномерных нестационарных уравнений газовой динамики.
20. Разрывные решения. Структура фронта ударной волны. Распад произвольного разрыва.
21. Основные уравнения движения вязкой жидкости.
22. Точные решения уравнений движения вязкой жидкости.
23. Приближенные решения уравнений движения вязкой жидкости в случае малых чисел Рейнольдса.
24. Приближенные решения уравнений движения вязкой жидкости в случае больших чисел Рейнольдса.
25. Элементы теории турбулентности.
26. Режимы движения атмосферы. Баланс сил в общем случае. Сила Кориолиса. Уравнение погоды.
27. Термодинамика атмосферы. Первое начало термодинамики применительно к атмосфере. Уравнения Пуассона.
28. Потенциальная температура. Термодинамические графики. Устойчивость слоя.
29. Радиационные процессы в атмосфере. Солнце и солнечная постоянная. Ослабление солнечной радиации в атмосфере.
30. Альбедо. Излучение земной поверхности. Парниковый эффект. Радиационный баланс.
31. Механизм испарения, конденсации, возгонки и сублимации с точки зрения термодинамики и молекулярно-кинетической теории.
32. Обмен энергией между водоемом и атмосферой.
33. Уравнение Навье – Стокса в приближении Буссинеска.
34. Конвективный теплоперенос в поверхностном слое водоема и его роль в установлении гидрологического режима.
35. Виды конвективных ячеек. Глобальная циркуляция. Масштабы метеорологических явлений.
36. Ячейки циркуляции. Циклоны и антициклоны. Стационарные фронты.
37. Циркуляция стратосферы. Струйные течения. Полярный вихрь.
38. Уравнения движения несжимаемой жидкости в декартовой системе координат.
39. Уравнения движения сжимаемой жидкости в декартовой системе координат.
40. Методы решения уравнения переноса вихря. Методы решения уравнений для функции тока. Граничные условия для уравнений переноса вихря и уравнения для функции тока.
41. Численные методы расчета движений несжимаемой жидкости.

42. Методы расчета течений без ударных волн и методы с выделением ударных волн.
43. Методы численного расчета ударных волн. Размазывание скачков при помощи искусственной диссипации.
44. Схемы с явной искусственной вязкостью (схемы фон Неймана-Рихтмайера, Ландсхофа и Лонгли, Русанова).
45. Схемы с неявной искусственной вязкостью (схемы с разностями против потока, метод частиц в ячейках и метод жидкости в ячейках, схема Лакса, схемы Лакса-Вендроффа).
46. Вязкость в уравнениях течения сжимаемой жидкости. Граничные условия для течений сжимаемой жидкости.
47. Численные методы газовой динамики. Основные понятия теории разностных схем.
48. Понятие устойчивости разностной схемы. Устойчивость разностных схем для уравнения переноса. Влияние вязкости на устойчивость разностных схем.
49. Реализация разностных схем газовой динамики. Явные методы.
50. Метод Ньютона. Метод прогонки. Применение метода Ньютона к решению разностных уравнений газовой динамики. Метод отдельных прогонок.
51. Полностью консервативные разностные схемы. Полностью консервативные разностные схемы для двумерных уравнений газовой динамики.
52. Уравнения движения в лагранжевых переменных. Полностью консервативная разностная схема для двумерных задач газовой динамики/

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)
Моделирование сложных систем	Кафедра компьютерного моделирования	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол №16 от 25.05.2020)
Компьютерные технологии в физическом эксперименте	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

№ № ПП	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