

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра аэрофизики и газовой динамики**



УТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н
В.Е.Блинов
2022 г.

Рабочая программа дисциплины

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ АЭРОГИДРОДИНАМИКА:
КЛАССИКА И СОВРЕМЕННОСТЬ 2**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**
Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	72	14	16		34	6			2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 32 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу
д.ф.-м.н., проф.

Цыбуля С. В.

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	9

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2» предназначена для обучения студентов-физиков основам современных методов математического моделирования физических процессов, теоретическое представление о которых они получают при параллельно изучаемом курсе общей физики.

Основной целью освоения дисциплины является ознакомление с методами численного решения задач аэрогидродинамики, применяемыми для расчета течений несжимаемой жидкости и до сверхзвуковых течений газа, получение практических навыков в применении этих методов для исследования физических явлений в области механики жидкости и газа. В основе курса «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2» лежит рассмотрение современных методов решения многомерных задач аэрогидродинамики дозвуковых и сверхзвуковых течений. Изучаются численные схемы для решения многомерного уравнения теплопроводности, прямые и итерационные методы решения стационарных задач, в частности уравнений Лапласа и Пуассона, решение уравнений пограничного слоя, несжимаемых и сжимаемых уравнений Навье-Стокса, различные подходы к моделированию турбулентных течений, способы обработки и визуализации результатов численного моделирования. Курс лекций дополнен практическими занятиями по численному моделированию многомерных задач аэрогидродинамики.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать современные численные схемы, используемые при расчете многомерных дозвуковых и сверхзвуковых течений жидкостей и газов, включая способы построения расчетных сеток;</p> <p>Уметь реализовывать изученные численные схемы в виде расчетных программ, использовать их для проведения вычислительного эксперимента; выбирать и применять схемы вычислительной аэрогидродинамики для численного решения конкретных задач механики жидкости и газа, проводить научные исследования в области аэрофизики и газовой динамики с помощью численного моделирования, используя как самостоятельно разработанные, так и сторонние вычислительные программы.</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		Владеть навыками самостоятельной работы с научной литературой по вычислительной аэрогидродинамике, понимать и использовать на практике методы численного моделирования течений жидкостей и газов, представлять результаты проведенных расчетов в виде отчетов и научных статей.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2» реализуется в весеннем семестре 4-го курса подготовки бакалавров, обучающихся по направлению 03.03.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой аэрофизики и газовой динамики. Излагаемый материал опирается на общие и специальные дисциплины, читаемые на физическом факультете, и полностью интегрирован в процесс обучения по курсам общей физики (кафедра общей физики) и механики жидкости и газовой динамики (кафедра аэрофизики и газовой динамики). Он является продолжением курса «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 1», читаемого в предыдущем семестре. Успешное освоение данного курса может быть полезным при выполнении выпускной квалификационной работы бакалавра, дальнейшей специализации в области механики жидкости и газа.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	72	14	16		34	6			2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 32 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, контрольные работы, самостоятельная работа студента.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: контроль посещения лекций, контроль освоения практического материала путем проведения опросов и приема обязательных заданий компьютерного спецпрактикума.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 14 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 40 часов;
- промежуточная аттестация (дифференцированный зачет) – 2 часа.

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, дифференцированный зачет) составляет 32 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 4-м курсе физического факультета НГУ в 8 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Схемы для решения многомерного уравнения теплопроводности.	1-3	8	2	4	2	
2.	Стационарные задачи. Прямые и итерационные методы для их решения	4-5	8	2	2	4	
3.	Решение уравнений пограничного слоя	6-7	6	2	2	2	
4.	Решение уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости	8-9	6	2	2	2	
5.	Решение уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа	10-11	8	2	2	4	
6.	Моделирование турбулентных течений	12-13	8	2	2	4	

7.	Обработка и визуализация данных численного моделирования	14-15	8	2	2	4	
8.	Выполнение обязательных заданий компьютерного спецпрактикума	16				12	
9.	Самостоятельная работа обучающегося, подготовка к зачету	17	6				6
10.	Дифференцированный зачет	17	2				2
Итого:			72	14	16	34	8

Программа и основное содержание лекций (14 часов)

1. Задачи с преобладанием диффузии. Решение уравнения теплопроводности в одном, двух и трех измерениях. Явные и неявные схемы. Трехдиагональная прогонка. Различные схемы метода переменных направлений и метода расщепления (2 часа).
2. Стационарные задачи. Решение уравнений Лапласа и Пуассона. Прямые методы. Итерационные методы Якоби, Гаусса-Зейделя, последовательной верхней релаксации. Методы переменных направлений и сильно неявный метод, LU-факторизация (2 часа).
3. Решение уравнений пограничного слоя. Нахождение автомодельных решения для несжимаемого и сжимаемого случае. Схемы для расчета неавтомодельных течений (2 часа).
4. Моделирование вязких течений несжимаемой жидкости. Уравнения Навье-Стокса в примитивных переменных, переменных «завихренность — функция тока» и «завихренность — скорость», методы их решения. Метод искусственной сжимаемости и проекционный метод (2 часа).
5. Моделирование многомерных невязких и вязких течений сжимаемого газа. Многомерные TVD и ENO схемы, способы аппроксимации вязких членов, интегрирование по времени. Примеры расчетов сверхзвуковых течений (2 часа).
6. Неустойчивость гидродинамических течений и переход к турбулентности. Постановка задачи о гидродинамической устойчивости. Различные подходы к моделированию турбулентных течений: уравнения, осредненные по Рейнольдсу, прямое численное моделирования и метод крупных вихрей (2 часа).
7. Обработка данных численного моделирования. Методы визуализации расчетных полей газодинамических величин, численные шпирен-визуализации, теневые картинки и интерферограммы (2 часа).

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Особенности программной реализации алгоритмов для решения многомерных задач аэрогидродинамики. Программа для решения двумерного уравнения теплопроводности на основе явной схемы. Использование неявной схемы и прогонки на примере решения одномерного уравнения теплопроводности (2 часа).

Занятие 2. Программная реализация неявных схем метода расщепления для решения двумерного уравнения теплопроводности. Сравнение эффективности явных и неявных схем в ходе вычислительных экспериментов (2 часа).

Занятие 3. Итерационные методы решения стационарных задач, программная реализация методов Якоби, Гаусса-Зейделя и последовательной верхней релаксации для уравнений Лапласа, и Пуассона, оценка скорости сходимости различных итерационных методов (2 часа).

Занятие 4. Программы для нахождения автомодельных решений несжимаемого и сжимаемого пограничного слоя. Вычислительные эксперименты – расчет автомодельных решений уравнений пограничного слоя при различных числах Маха и граничных условий для температуры (2 часа).

Занятие 5. Программа для решения двумерных несжимаемых уравнений Навье-Стокса в переменных «завихренность - функция тока». Расчет с ее помощью течения в каверне с движущейся крышкой (2 часа)

Занятие 6. Знакомство с решением уравнений Эйлера и Навье-Стокса для двумерных течений сжимаемого газа. Сверхзвуковые течения над плоской пластиной и клином (2 часа).

Занятие 7. Решение уравнения Орра-Зоммерфельда методом стрельбы и спектральным методом. Вычисление критического числа Рейнольдса и других характеристик устойчивости для течения Пуазейля и течения в пограничном слое на плоской пластине (2 часа).

Занятие 8. Программы для построения численных интерферограмм, теневых картин и шлирен-визуализаций. Их использование для визуализации результатов расчетов на примере задачи о дифракции ударной волны (2 часа).

Самостоятельная работа студентов (40 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	12
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	10
Выполнение обязательных заданий компьютерного спецпрактикума	12
Подготовка к дифференцированному зачету	6

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература

1. Годунов С.К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
2. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967.
3. Пинчуков В. И., Шу Ч.-В. Численные методы высоких порядков для задач аэрогидродинамики. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

5.2. Дополнительная литература

1. Лебедев А.С., Черный С.Г. Практикум по численному решению уравнений в частных производных. Учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 2000.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010, 76 с.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 2010. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
2. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Численные методы газовой динамики. М.: Высшая школа, 1987.
3. Toro E. F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>

4. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - М: Мир, 1990. Т. 1-2.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 1-2.
6. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2001, 2012.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины могут также использоваться:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;

Слайды лекций, задания и примеры вычислительных программ размещаются на странице сообщества «Вычислительная гидродинамика» в социальной сети «В контакте»: https://vk.com/agdnsu_cfd.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office, также используется комплект свободно распространяемого программного обеспечения, включающий операционную систему Linux / Ubuntu, компилятор gfortran, текстовый редактор, программу визуализации gnuplot.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным

программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения контрольных работ и приема заданий компьютерного спецпрактикума.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания вычислительной аэрогидродинамики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачете. Зачет проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по вопросам в устной форме. Вопросы подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать современные численные схемы, используемые при расчете многомерных дозвуковых и сверхзвуковых течений жидкостей и газов, включая способы построения расчетных сеток.	Проведение контрольных работ, дифференцированный зачет.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь реализовывать изученные численные схемы в виде расчетных программ, использовать их для проведения вычислительного эксперимента; выбирать и применять схемы вычислительной аэрогидродинамики для численного решения конкретных задач механики жидкости и газа, проводить научные исследования в области аэрофизики и газовой динамики с помощью	Проведение контрольных работ, дифференцированный зачет.

	численного моделирования, используя как самостоятельно разработанные, так и сторонние вычислительные программы.	
ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	Владеть навыками самостоятельной работы с научной литературой по вычислительной аэрогидродинамике, понимать и использовать на практике методы численного моделирования течений жидкостей и газов, представлять результаты проведенных расчетов в виде отчетов и научных статей.	Проведение контрольных работ, дифференцированный зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Образец контрольной работы

1. Аппроксимируем уравнение переноса $\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0$ $a > 0$ схемой

“бегущего счета”:
$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} + a \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{h} = 0.$$

Перечислите свойства разностных схем? Какими из них (докажите) обладает эта схема?

2. Что такое схемная вязкость? Поясните на примере разностной схемы $\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} +$

$a \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{h} = 0$ для уравнения переноса $\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0$, $a > 0$. Поясните, почему эта схема

сглаживает разрыв в решении, а схема “крест” $\frac{u_j^{n+1} - u_j^{n-1}}{2\tau} + a \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2h} = 0$ приводит к осцилляциям на разрыве?

Почему неявные схемы “бегущего счета” больше чем явные сглаживают разрыв?

3. Нарисуйте блок-схему алгоритма решения начально-краевой задачи (подробная детализация этапов вычислений для реализации на ЭВМ)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad a > 0, \quad u(0, x) = u_0, \quad u(t, 0) = u_L$$

в области $\Omega\{0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq X\}$, с использованием схемы $\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} + a \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{h} = 0.$

Задания компьютерного спецпрактикума

ЗАДАНИЕ 1

С помощью конечно-разностной схемы продольно-поперечной прогонки найти решение начально-краевой задачи для двумерного уравнения теплопроводности. Определить погрешность аппроксимации и устойчивость схемы. Составить алгоритм, осуществить его реализацию на ЭВМ. Проверить устойчивость и сходимость схемы на последовательности измельчающихся сеток. Провести табличное и графическое сравнение результатов с точным решением данной задачи.

ЗАДАНИЕ 2

С помощью итерационной схемы стабилизирующей поправки или схемы расщепления найти решение начально-краевой задачи для уравнения Лапласа или Пуассона. Определить погрешность аппроксимации и устойчивость схемы. Составить алгоритм, осуществить его реализацию на ЭВМ. Проверить устойчивость и сходимость схемы на последовательности измельчающихся сеток. Осуществить выбор оптимального параметра τ . Условие прекращения итераций задавать в виде $\max |u_{i,j}^{s+1} - u_{i,j}^s| / \max |u_{i,j}^s| \leq \varepsilon$. Исследовать роль величины ε . Осуществить сравнение точного и сеточных решений задачи (полученных на последовательности сеток).

Вопросы к дифференцированному зачету

1. Неявные схемы для одномерного уравнения теплопроводности.
2. Полностью неявная схема и схема Кранка-Николсона для двумерного уравнения теплопроводности. Матричная прогонка.
3. Метод переменных направлений для двумерных и трехмерных уравнений теплопроводности.
4. Метод расщепления для двумерных и трехмерных уравнений теплопроводности.

5. Дискретизация двумерных и трехмерных уравнений Лапласа и Пуассона и прямые методы их решения.
6. Итерационные методы Якоби и Гаусса-Зейделя.
7. Метод последовательной верхней релаксации. Релаксация по строкам и столбцам.
8. Неявный метод переменных направлений. Понятие о сильно неявных методах.
9. Уравнения пограничного слоя и численное нахождение их автомодельных решений.
10. Явные и неявные схемы для расчета неавтомодельных решений уравнений пограничного слоя.
11. Формулировка уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в различных переменных.
12. Решение несжимаемых уравнений Навье-Стокса в переменных «завихренность – функция тока».
13. Решение несжимаемых уравнений Навье-Стокса в примитивных переменных. Проекционный метод.
14. Метод искусственной сжимаемости.
15. Аппроксимация вязких членов в сжимаемых уравнениях Навье-Стокса.
16. Неустойчивость течений жидкости. Уравнения Рэлея и Орра-Зоммерфельда.
17. Метод стрельбы и ортогонализация по Годунову для решения уравнений устойчивости.
18. Спектральный метод для решения уравнений устойчивости.
19. Переход к турбулентности и его численное моделирование.
20. Моделирование турбулентных течений на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений.
21. Прямое численное моделирование турбулентных течений и их моделирование с помощью метода крупных вихрей.
22. Методы визуализации данных численного моделирования.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы по дисциплине
«Вычислительная аэрогидродинамика: классика и современность 2»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного