

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского



**Программа дисциплины**

Методы решения сеточных уравнений М2.ДВ.3

Направление подготовки: 010800.68 - Механика и математическое моделирование

Профиль подготовки: Механика жидкости, газа и плазмы

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Мазо А.Б.

**Рецензент(ы):**

-

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Егоров А. Г.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_ от "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского :

Протокол заседания УМК No \_\_\_ от "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 81724114

Казань  
2014

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) профессор, д.н. (доцент) Мазо А.Б. Кафедра аэрогидромеханики отделение механики, Alexander.Mazo@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины "Методы решения сеточных уравнений" (МРСУ) является изучение и практическое освоение прямых и итерационных методов решения сеточных схем для задач вычислительной гидродинамики, которые представляют собой разреженные системы алгебраических уравнений большой размерности. Изучаются элементы алгебры разреженных матриц. Рассматривается связь портрета матрицы сеточного уравнения с топологией сетки. Студент знакомится с алгоритмами оптимальной перенумерации узлов сетки, позволяющей минимизировать заполнение при LU или LDU разложении. Итерационные методы решения больших систем уравнений излагаются с общих позиций в терминах операторов перехода, расщепления и предобуславливания. Даны конкретные алгоритмы реализации как основных методов (простой итерации, Зейделя, градиентного суска), так и быстрых методов типа SOR и CG, ускоренных за счет применения различных предобуславливателей и выбора параметров экстраполяции. Излагаются основы геометрического многосеточного метода.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел "М2.ДВ.3 Профессиональный" основной образовательной программы 010800.68 Механика и математическое моделирование и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 1 курсе, 1, 2 семестры.

Дисциплина входит в специальную часть профессионального цикла; она является продолжением курса "Методы решения сеточных уравнений". Для ее освоения нужны первоначальные знания из курсов функционального анализа, линейной алгебры, а также умение программировать. Получаемые знания, умения и навыки необходимы для решения математических задач, сводящихся к разреженным системам алгебраических уравнений большой размерности, и используются при выполнении магистерских диссертаций по направлению "механика и математическое моделирование".

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-7 (общекультурные компетенции)	способностью к организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, к управлению научным коллективом
ОК-9 (общекультурные компетенции)	способностью к организации и планированию
ПК-1 (профессиональные компетенции)	владением методами математического моделирования при анализе глобальных проблем на основе глубоких знаний фундаментальных математических дисциплин и компьютерных наук
ПК-10 (профессиональные компетенции)	способностью к собственному видению прикладного аспекта в строгих математических формулировках

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-11 (профессиональные компетенции)	способностью к творческому применению, развитию и реализации математически сложных алгоритмов в современных специализированных программных комплексах
ПК-14 (профессиональные компетенции)	владением методами физического и математического моделирования при анализе глобальных проблем на основе глубоких знаний фундаментальных физико-математических дисциплин, теории эксперимента и компьютерных наук
ПК-2 (профессиональные компетенции)	владением методами математического и алгоритмического моделирования при анализе проблем техники и естествознания
ПК-9 (профессиональные компетенции)	умением ориентироваться в современных алгоритмах компьютерной математики, совершенствовать, углублять и развивать математическую теорию и физико-механические модели, лежащие в их основе

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

основные прямые и итерационные методы решения больших разреженных систем алгебраических уравнений

2. должен уметь:

применять основные прямые и итерационные методы для решения больших разреженных систем алгебраических уравнений

3. должен владеть:

прямыми и итерационными методами решения сеточных уравнений

4. должен демонстрировать способность и готовность:

применять численные методы для решения на компьютере типичных задач гидродинамики и теплопереноса.

4. должен демонстрировать способность и готовность:

методы получения, хранения и обработки больших разреженных систем уравнений. Приемы конструирования предобуславливающих матриц.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет зачетных(ые) единиц(ы) 144 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины отсутствует в 1 семестре; зачет во 2 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Сеточные схемы МКР, МКО и МКЭ для задач термогидродинамики как большие разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).	1	1-2	2	4	0	устный опрос
2.	Тема 2. Схемы хранения разреженных матриц и элементы алгебры разреженных матриц. Связь топологии сеток и портретов матриц. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени. Ленточные матрицы. Разреженный строчный формат хранения.	1	3-6	2	4	0	домашнее задание
3.	Тема 3. Прямые методы решения СЛАУ. Метод прогонки для ленточных матриц. Метод факторизации Холецкого и LDU-разложение.	1	7-10	2	4	0	контрольная работа

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
4.	Тема 4. Итерационные методы решения СЛАУ. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Условия сходимости итерационных методов. Базовые стационарные итерационные методы: Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска. Выбор оптимальных параметров. Методы релаксации SOR, SSOR.	1	11-16	2	4	0	домашнее задание
5.	Тема 5. Быстрые нестационарные итерационные процессы. Метод сопряженных направлений, чебышевский метод	2	1-4	4	6	0	домашнее задание
6.	Тема 6. Предобуславливающие операторы (preconditioners). Предобуславливатель Якоби. Неполное разложение Холецкого, модифицированное неполное разложение. Предобуславливание и масштабирование	2	5-10	4	6	0	домашнее задание
7.	Тема 7. Многосеточный метод. Операторы сглаживания, ограничения и продолжения. V и W циклы	2	11-14	4	6	0	реферат

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
	Тема . Итоговая форма контроля	1		0	0	0	зачет
	Тема . Итоговая форма контроля	2		0	0	0	зачет
	Итого			20	34	0	

## 4.2 Содержание дисциплины

### Тема 1. Сеточные схемы МКР, МКО и МКЭ для задач термогидродинамики как большие разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

#### *лекционное занятие (2 часа(ов)):*

Построение сеточных схем методами конечных разностей (МКР), конечных объемов (МКО) и конечных элементов (МКЭ). Сеточные схемы как разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности. Свойства матриц СЛАУ: симметричность, положительная определенность, невырожденность. Учет граничных условий Дирихле и симметризация матриц. Собственные числа и собственные векторы матриц. Спектр, нормы и число обусловленности матриц.

#### *практическое занятие (4 часа(ов)):*

Построение линеаризованных сеточных схем методами конечных разностей (МКР), конечных объемов (МКО) и конечных элементов (МКЭ) для типичных уравнений термогидродинамики.

### Тема 2. Схемы хранения разреженных матриц и элементы алгебры разреженных матриц. Связь топологии сеток и портретов матриц. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени. Ленточные матрицы. Разреженный строчный формат хранения.

#### *лекционное занятие (2 часа(ов)):*

Различные схемы хранения разреженных матриц большой размерности. Портрет матрицы. Ширина ленты и профиль. Связь топологии сеток и портретов матриц для МКР, МКЭ и МКО. Разреженный строчный формат хранения с упорядочением и без. Элементы алгебры разреженных матриц. Экономичные алгоритмы умножения матрицы на вектор, умножения матриц, скалярного произведения векторов. Эффект заполнения при треугольной факторизации матрицы. Ленточная схема хранения матрицы. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки для минимизации ширины ленты. Алгоритм минимальной степени для минимизации заполнения.

#### *практическое занятие (4 часа(ов)):*

Представление матрицы сеточной схемы для двумерного уравнения теплопроводности в обычном, разреженном строчном и ленточном формате хранения. Реализация экономичных алгоритмов алгебры разреженных матриц. Применение алгоритмов перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени.

### Тема 3. Прямые методы решения СЛАУ. Метод прогонки для ленточных матриц. Метод факторизации Холецкого и LDU-разложение.

#### *лекционное занятие (2 часа(ов)):*

Трехточечные схемы МКР и МКЭ для одномерных уравнений конвекции-диффузии. Ленточная схема хранения трехдиагональной матрицы. Метод прогонки (алгоритм Томаса). Метод факторизации Холецкого (метод квадратного корня) и тройной факторизации (LDU-разложение) для положительно определенных матриц. Методы прямого решения СЛАУ с факторизованной матрицей.

#### *практическое занятие (4 часа(ов)):*



Численное решение одномерного уравнения конвекции-диффузии для с применением метода прогонки. Численное решение двумерного уравнения теплопроводности с применением метода тройной факторизации.

**Тема 4. Итерационные методы решения СЛАУ. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Условия сходимости итерационных методов. Базовые стационарные итерационные методы: Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска. Выбор оптимальных параметров. Методы релаксации SOR, SSOR.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Итерационные методы решения СЛАУ. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа: свойства операторов и матриц, некоторые нормы векторов и матриц, сходимость по норме. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Каноническая форма 1 двухслойного итерационного процесса. Оператор перехода и матрица расщепления. Условия сходимости итерационных методов. Скорость сходимости. Базовые стационарные итерационные методы: Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска, минимальных невязок. Выбор оптимальных параметров. Каноническая форма 2 двухслойного итерационного процесса. Условие сходимости. Методы релаксации SOR, SSOR. Условия сходимости.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Численное решение модельной эллиптической задачи с применением базовых стационарных и вариационных методов. Сравнение скорости сходимости. Численное исследование влияния параметра релаксации на скорости сходимости методов SOR и SSOR.

**Тема 5. Быстрые нестационарные итерационные процессы. Метод сопряженных направлений, чебышевский метод**

**лекционное занятие (4 часа(ов)):**

Метод сопряженных направлений (CGM). Теория и вывод формул метода, различные формы реализации CGM. Модификация метода при использовании предобуславливателя. Итерационный метод решения СЛАУ с чебышевским набором параметров. Сравнение скорости сходимости метода с SOR и CGM.

**практическое занятие (6 часа(ов)):**

Численное решение модельной эллиптической задачи с применением итерационных методов сопряженных направлений и чебышевского метода.

**Тема 6. Предобуславливающие операторы (preconditioners). Предобуславливатель Якоби. Неполное разложение Холецкого, модифицированное неполное разложение. Предобуславливание и масштабирование**

**лекционное занятие (4 часа(ов)):**

Предобуславливающие матрицы как средство ускорения сходимости. Требование к предобуславливателю: близость спектральных свойств к исходной матрице и простота обращения. Диагональный предобуславливатель Якоби. Трехдиагональный предобуславливатель. Факторизованный треугольный предобуславливатель неполное разложение Холецкого (ILU) и модифицированного неполного разложения (MILU). Два варианта MILU и MILDU. Предобуславливание и масштабирование для плохообусловленных матриц с сильно меняющимися коэффициентами.

**практическое занятие (6 часа(ов)):**

Численное решение модельной задачи методом CGM с предобуславливателем Якоби. Построение предобуславливателей ILU и MILDU. Численное решение модельной задачи с сильно меняющимися коэффициентами методом CGM с предобуславливателями ILU и MILDU. Реализация масштабирования матрицы. Сравнение скорости сходимости.

**Тема 7. Многосеточный метод. Операторы сглаживания, ограничения и продолжения. V и W циклы**

**лекционное занятие (4 часа(ов)):**



Метод двухсеточной коррекции. Операторы сглаживания (метод Зейделя), варианты операторов ограничения (fine-to-coarse) и продолжения (coarse-to-fine). Прямая инъекция, полное и неполное взвешивание. Многосеточный геометрический метод для сеточных схем на структурированных сетках. V и W циклы. Понятие о негнездованных (non-nested) многосеточных методах для неструктурированных сеток.

**практическое занятие (6 часа(ов)):**

Решение модельной эллиптической задачи методом двухсеточной коррекции. Численное решение модельной эллиптической задачи на прямоугольной равномерной сетке многосеточным геометрическим методом (V-циклы).

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Сеточные схемы МКР, МКО и МКЭ для задач термогидродинамики как большие разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).	1	1-2	подготовка к устному опросу	10	устный опрос
2.	Тема 2. Схемы хранения разреженных матриц и элементы алгебры разреженных матриц. Связь топологии сеток и портретов матриц. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени. Ленточные матрицы. Разреженный строчный формат хранения.	1	3-6	подготовка домашнего задания	12	домашнее задание
3.	Тема 3. Прямые методы решения СЛАУ. Метод прогонки для ленточных матриц. Метод факторизации Холецкого и LDU-разложение.	1	7-10	подготовка к контрольной работе	12	контрольная работа

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
4.	Тема 4. Итерационные методы решения СЛАУ. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Условия сходимости итерационных методов. Базовые стационарные итерационные методы: Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска. Выбор оптимальных параметров. Методы релаксации SOR, SSOR.	1	11-16	подготовка домашнего задания	14	домашнее задание
5.	Тема 5. Быстрые нестационарные итерационные процессы. Метод сопряженных направлений, чебышевский метод	2	1-4	подготовка домашнего задания	14	домашнее задание
6.	Тема 6. Предобуславливающие операторы (preconditioners). Предобуславливатель Якоби. Неполное разложение Холецкого, модифицированное неполное разложение. Предобуславливание и масштабирование	2	5-10	подготовка домашнего задания	14	домашнее задание
7.	Тема 7. Многосеточный метод. Операторы сглаживания, ограничения и продолжения. V и W циклы	2	11-14	подготовка к реферату	14	реферат
	Итого				90	

## 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

лекции с применением средств мультимедиа, самостоятельная работа (программирование) с использованием учебного пособия по курсу ВГ, лабораторные занятия, контрольные работы, зачет. В течение семестра студенты решают набор модельных задач ВГ, указанных преподавателем, к каждому лабораторному занятию. В каждом семестре проводятся контрольные работы (на лабораторных занятиях). К экзамену допускаются студенты, сдавшие все задачи и показавшие положительные результаты по текущей работе в течение семестра.

## 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

### Тема 1. Сеточные схемы МКР, МКО и МКЭ для задач термогидродинамики как большие разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

устный опрос, примерные вопросы:

Как строятся сетки в МКР, МКО и МКЭ? Как строятся сеточные схемы для типичных задач вычислительной гидродинамики методами МКР, МКО и МКЭ? Как связан портрет матрицы СЛАУ с топологией сетки?

### Тема 2. Схемы хранения разреженных матриц и элементы алгебры разреженных матриц. Связь топологии сеток и портретов матриц. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени. Ленточные матрицы. Разреженный строчный формат хранения.

домашнее задание, примерные вопросы:

Написать программу на C++, реализующую разреженный строчный формат хранения матрицы и элементарные операции алгебры разреженных матриц. Построить неструктурированную МКЭ-сетку с помощью генератора GridGen, нарисовать портрет матрицы, проверить как влияет перенумерация узлов сетки на портрет и заполнение матрицы.

### Тема 3. Прямые методы решения СЛАУ. Метод прогонки для ленточных матриц. Метод факторизации Холецкого и LDU-разложение.

контрольная работа, примерные вопросы:

Темы: Сеточные схемы МКР, МКО, МКЭ. Элементы технологии разреженных матриц. Прямые методы решения СЛАУ большой размерности.

### Тема 4. Итерационные методы решения СЛАУ. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Условия сходимости итерационных методов. Базовые стационарные итерационные методы: Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска. Выбор оптимальных параметров. Методы релаксации SOR, SSOR.

домашнее задание, примерные вопросы:

Запрограммировать итерационные методы Рундсона, Якоби, Зейделя, простой итерации, наискорейшего спуска SOR, SSOR. Решить модельную эллиптическую задачу. Сравнить скорость сходимости. Результаты представить в графическом виде.

### Тема 5. Быстрые нестационарные итерационные процессы. Метод сопряженных направлений, чебышевский метод

домашнее задание, примерные вопросы:

Запрограммировать итерационный метод CG. Решить модельную эллиптическую задачу. Сравнить скорость сходимости с методом SOR. Результаты представить в графическом виде.

### Тема 6. Предобуславливающие операторы (preconditioners). Предобуславливатель Якоби. Неполное разложение Холецкого, модифицированное неполное разложение. Предобуславливание и масштабирование

домашнее задание, примерные вопросы:

Запрограммировать итерационный метод CG с предобуславливателями J, ILU, MILU. Решить модельную эллиптическую задачу с осциллирующими коэффициентами. Сравнить скорость сходимости с классическим методом CG. Проверить эффект от масштабирования.

### **Тема 7. Многосеточный метод. Операторы сглаживания, ограничения и продолжения. V и W циклы**

реферат , примерные темы:

Тема реферата: Решение задачи теплопроводности с применением многосеточного метода. В реферате, помимо теоретического описания метода, должны быть представлены результаты расчета.

### **Тема . Итоговая форма контроля**

### **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

Проверка теоретических знаний и практических навыков осуществляется по 100-балльной рейтинговой системе, принятой к КФУ. 50 баллов отводится для оценки текущей успеваемости, 50 - для оценки на зачете. Проводятся две контрольные работы в конце каждого семестра; на лабораторных работах проверяются и зачитываются компьютерные программы, составленные каждым студентом и реализующие все MPCY.

Зачет принимается в конце семестра А; зачет ставится, если сумма баллов текущей успеваемости и оценки на зачете превышает 51.

### **ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ**

1. Схемы хранения разреженных матриц и элементы алгебры разреженных матриц.
2. Связь топологии сеток и портретов матриц. Алгоритм перенумерации узлов Катхилла-Макки и минимальной степени.
3. Ленточные матрицы.
4. Разреженный строчный формат хранения.
5. Прямые методы решения СЛАУ. Метод прогонки для ленточных матриц.
6. Метод факторизации Холецкого и LDU-разложение.
7. Общая теория итерационных методов. Сведения из алгебры и функционального анализа.
8. Сеточные уравнения как матричные и операторные уравнения. Условия сходимости итерационных методов.
9. Стационарные итерационные методы: Ричардсона, Якоби, Зейделя, простой итерации.
10. Метод наискорейшего спуска. Выбор оптимальных параметров.
11. Методы релаксации SOR, SSOR.
12. Метод сопряженных направлений (CG и его варианты).
13. Предобуславливатель Якоби.
14. Предобуславливатели: Неполное разложение Холецкого, модифицированное неполное разложение.
15. Предобуславливание и масштабирование.
16. Геометрический многосеточный метод.
17. Операторы сглаживания, ограничения и продолжения.
18. V и W циклы. Полный цикл MGM.

### **7.1. Основная литература:**

Особенности численной реализации методов решения прямых и обратных краевых задач аэрогидродинамики, Марданов, Ренат Фаритович, 2013г.

Механика сплошной среды, Нигматулин, Роберт Искандерович, 2014г.

1. Бухгольц, Н.Н. Основы курса теоретической механики. Ч. 1: Кинематика, статика, динамика материальной точки : учебник Издательство: Лань, 2009. - 480 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/32/>
2. Бухгольц, Н.Н. Основы курса теоретической механики. Ч. 2: Динамика системы материальных точек : учебник Издательство: Лань, 2009. - 336 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/33/>
3. Мещерский И.В. Сборник задач по теоретической механике: учебник Издательство: Лань, 2012. - 448 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/2786/>
4. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Том 1: Статика и кинематика: учебник Издательство: Лань, 2013. - 672 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/4551/>
5. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. 2: Динамика: учебник Издательство: Лань, 2013. - 640 с. // <http://e.lanbook.com/view/book/4552/>

## 7.2. Дополнительная литература:

Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости, Мазо, Александр Бенцианович, 2007г.

Гидродинамика, Мазо, Александр Бенцианович; Поташев, Константин Андреевич, 2008г.

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды: учебник для вузов. - Издание 4-е, исправленное и дополненное. - Москва: Наука, 1984. - 560 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник. - Издание 7-е, исправленное. - Москва: Дрофа, 2003. - 840 с.

## 7.3. Интернет-ресурсы:

А.А. Самарский, Е.С. Николаев. Методы решения сеточных уравнений -

[http://eknigi.org/estestvennye\\_nauki/146927-metody-resheniya-setochnyx-uravnenij.html](http://eknigi.org/estestvennye_nauki/146927-metody-resheniya-setochnyx-uravnenij.html)

Бесплатная электронная библиотека. А.А. Самарский, А.В. Гулин, Численные методы -

<http://www.mat.net.ua/mat/Gulin-Chislennye-metodi.htm>

Научная электронная библиотека - <http://elibrary.ru/>

Реферативная база научной информации - <http://www.scopus.com/home.url>

Электронные ресурсы издательства - <http://link.springer.com/>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Методы решения сеточных уравнений" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Компьютерный класс, представляющий собой рабочее место преподавателя и не менее 15 рабочих мест студентов, включающих компьютерный стол, стул, персональный компьютер, лицензионное программное обеспечение. Каждый компьютер имеет широкополосный доступ в сеть Интернет. Все компьютеры подключены к корпоративной компьютерной сети КФУ и находятся в едином домене.

учебные аудитории для проведения лекционных и семинарских занятий, компьютерный класс с набором базового программного обеспечения разработчика - системы программирования на языках C++ и Delphi с возможностью много-пользовательской работы и централизованного администрирования.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 010800.68 "Механика и математическое моделирование" и магистерской программе Механика жидкости, газа и плазмы .

Автор(ы):

Мазо А.Б. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.