

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Методы параллельных вычислений
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

С.Т. Суржиков, д-р физ.-мат. наук, профессор

А.С. Дикалюк, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физической и химической механики 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Методы параллельных вычислений" предусматривает изучение основ параллельного программирования с использованием технологий OpenMP, MPI, CUDA, а так же алгоритмов, допускающих эффективную реализацию на многопроцессорных системах и применимых для решения вычислительных задач физической механики.

Задачи курса:

- освоение студентами базовых знаний в области параллельных вычислений на системах с общей и распределенной памятью;
- приобретение теоретических знаний параллельного программирования, изучения основных функций и методов наиболее распространенных в настоящее время технологий распараллеливания OpenMP, MPI, CUDA;
- изучение алгоритмов, допускающих эффективную реализацию на многопроцессорных системах с общей и распределенной памятью и применимых для решения вычислительных задач физической механики;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области компьютерной физики с использованием многопроцессорных систем.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- ☐ фундаментальные понятия, связанные с различными параллельными системами и соответствующими методами;
- ☐ современные проблемы многопроцессорных вычислительных систем и алгоритмов;
- ☐ основные (базовые) методы и алгоритмы, применяемые на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ математический аппарат теории вычислительных методов, пригодных для реализации на многопроцессорных системах.

Уметь:

- ☐ пользоваться численными методами для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики с использованием многопроцессорных систем с общей и распределенной памятью;
- ☐ оценивать эффективность различных алгоритмов, применимых на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ ставить задачи для тестирования алгоритмов, реализуемых на многопроцессорных системах.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Современные высокопроизводительные вычислительные системы
2. Методы распараллеливания на системах с общей памятью. Основные конструкции Open MP
3. Методы распараллеливания на системах с распределенной памятью. Основные конструкции MPI
4. Методы распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Основные конструкции CUDA
5. Реализация численных методов на многопроцессорных системах
6. Распараллеливание отдельных частей вычислительного алгоритма
7. Параллельные итерационные методы
8. Реализация векторизованных алгоритмов решения краевых задач
9. Вычисления на графических процессорах

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение основ параллельного программирования с использованием технологий OpenMP, MPI, CUDA, а также алгоритмов, допускающих эффективную реализацию на многопроцессорных системах и применимых для решения вычислительных задач физической механики.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области параллельных вычислений на системах с общей и распределенной памятью;
- приобретение теоретических знаний параллельного программирования, изучения основных функций и методов наиболее распространенных в настоящее время технологий распараллеливания OpenMP, MPI, CUDA;
- изучение алгоритмов, допускающих эффективную реализацию на многопроцессорных системах с общей и распределенной памятью и применимых для решения вычислительных задач физической механики;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области компьютерной физики с использованием многопроцессорных систем.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ фундаментальные понятия, связанные с различными параллельными системами и соответствующими методами;
- ☐ современные проблемы многопроцессорных вычислительных систем и алгоритмов;
- ☐ основные (базовые) методы и алгоритмы, применяемые на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ математический аппарат теории вычислительных методов, пригодных для реализации на многопроцессорных системах.

уметь:

- ☐ пользоваться численными методами для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики с использованием многопроцессорных систем с общей и распределенной памятью;
- ☐ оценивать эффективность различных алгоритмов, применимых на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ ставить задачи для тестирования алгоритмов, реализуемых на многопроцессорных системах.

владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ культурой постановки и численного моделирования физических задач с использованием современных многопроцессорных систем;
- ☐ практикой компьютерного исследования и решения теоретических и прикладных задач с использованием современных многопроцессорных систем.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Современные высокопроизводительные вычислительные системы	6			3
2	Методы распараллеливания на системах с общей памятью. Основные конструкции Open MP	6			3
3	Методы распараллеливания на системах с распределенной памятью. Основные конструкции MPI	6			3
4	Методы распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Основные конструкции CUDA	6			3
5	Реализация численных методов на многопроцессорных системах	6			3
6	Распараллеливание отдельных частей вычислительного алгоритма	8			8
7	Параллельные итерационные методы	6			6
8	Реализация векторизованных алгоритмов решения краевых задач	8			8
9	Вычисления на графических процессорах	8			8
Итого часов		60			45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

###### Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Современные высокопроизводительные вычислительные системы

Классификация современных высокопроизводительных вычислительных систем. Основные понятия и определения, параметры. Основные компьютерные средства для реализации параллельных вычислительных программ: Open MP, MPI, CUDA.

###### 2. Методы распараллеливания на системах с общей памятью. Основные конструкции Open MP

Обзор OpenMP. Основные свойства языка OpenMP: переменные окружения, директивы компилятора, библиотечные процедуры. Способы применения конструкций OpenMP для типичных ситуаций, возникающих в процессе разработки параллельной вычислительной программы. Способы использования OpenMP для создания эффективных алгоритмов на вычислительных системах с общей памятью. Типичные ошибки и способы их устранения при реализации параллельных алгоритмов на системах с общей памятью с использованием технологии OpenMP. Постановка практической задачи для самостоятельной реализации первой программы с использованием OpenMP по перемножению матрицы на вектор.

### 3. Методы распараллеливания на системах с распределенной памятью. Основные конструкции MPI

Основные понятия. Общие процедуры MPI. Передача/прием сообщений между отдельными процессами. Коллективные взаимодействия процессов. Группы и коммутаторы. Виртуальные топологии. Пересылка разнотипных данных. Задания для самостоятельной работы по теме лекций.

### 4. Методы распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Основные конструкции CUDA

Введение. Графические процессоры с параллельной архитектурой. Устройство графических процессоров. Модель программирования. Структура памяти. Технология CUDA. Измерение производительности и метрики производительности. Оптимизация. Программирование компьютера с несколькими GPU.

### 5. Реализация численных методов на многопроцессорных системах

Требования к параллельным алгоритмам и их реализации. Схема решения задачи. Хранение данных. Способы разбиения. Характеристики производительности: теоретический анализ и расчетные оценки. Балансировка нагрузки процессоров. Синхронизация шага по времени.

## Семестр: 2 (Весенний)

### 6. Распараллеливание отдельных частей вычислительного алгоритма

Вычисление частных сумм. Умножение матрицы на вектор. Умножение матрица на матрицу. Умножение ленточных матриц. Возведение в степень блочно-диагональных матриц. Метод LU-разложения. Метод QR-разложения. Метод Якоби

### 7. Параллельные итерационные методы

Решения дифференциальных уравнений в частных производных. Общая структура. Метод Якоби. Метод Гаусса-Зейделя. Метод последовательной верхней релаксации. Сравнения различных подходов. Решение уравнения Пуассона. Течение в каверне.

### 8. Реализация векторизованных алгоритмов решения краевых задач

Адресация к значениям сеточной функции. Вычисление производных. Формулировка краевой задачи. Граничные условия. Векторы вычислительных переменных. Формулы перехода. Разностная схема в вычислительных переменных. Метод прогонки.

### 9. Вычисления на графических процессорах

Примеры вычислительных методов, реализованных с использованием технологии распараллеливания CUDA: метод Монте-Карло, метод конечных разностей, приложения быстрого преобразования Фурье.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Введение в вычислительную математику [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. С. Рябенский .— 3-е изд., испр. и доп. — М. : Физматлит, 2008 .— 288 с.
2. MATLAB 7 [Текст] : программирование, численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц .— СПб. : БХВ-Петербург, 2005 .— 737 с.
3. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст] / В. М. Вержбицкий - М.Высшая школа,2001
4. Практикум по методам параллельных вычислений [Текст] : учебник для вузов / А. В. Старченко [и др.] ; под ред. А. В. Старченко ; Томск. гос. ун-т .— М. : Изд-во Моск. ун-та, 2010 .— 200 с.
5. Вычислительная математика и структура алгоритмов [Текст] : 10 лекций о том, почему трудно решать задачи на вычислительных системах параллельной архитектуры и что надо знать дополнительно, чтобы успешно преодолевать эти трудности : учебник для вузов / В. В. Воеводин ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова .— 2-е изд., стереотип. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 2010 .— 168 с.

### Дополнительная литература

1. Введение в параллельные методы решения задач [Текст] / М. В. Якововский ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) - М.Изд-во Моск. ун-та,2013
2. Параллельные вычисления [Текст], учеб. пособие для вузов /В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. -СПб., БХВ-Петербург, 2002
3. Основы параллельного программирования [Текст] / К. Ю. Богачев .— [Учебное изд.] .— М. : БИНОМ.Лаборатория знаний, 2003 .— 342 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

не предусмотрены.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической и химической механики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

С.Т. Суржиков, д-р физ.-мат. наук, профессор  
А.С. Дикалюк, канд. физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Методы параллельных вычислений» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные понятия, связанные с различными параллельными системами и соответствующими методами;
- ☐ современные проблемы многопроцессорных вычислительных систем и алгоритмов;
- ☐ основные (базовые) методы и алгоритмы, применяемые на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ математический аппарат теории вычислительных методов, пригодных для реализации на многопроцессорных системах.

### уметь:

- ☐ пользоваться численными методами для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики с использованием многопроцессорных систем с общей и распределенной памятью;
- ☐ оценивать эффективность различных алгоритмов, применимых на современных многопроцессорных вычислительных системах;
- ☐ ставить задачи для тестирования алгоритмов, реализуемых на многопроцессорных системах.

### владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ культурой постановки и численного моделирования физических задач с использованием современных многопроцессорных систем;
- ☐ практикой компьютерного исследования и решения теоретических и прикладных задач с использованием современных многопроцессорных систем.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Классификация современных высокопроизводительных вычислительных систем
2. Распараллеливание на системах с общей памятью. Основные свойства языка OpenMP: переменные окружения, директивы компилятора, библиотечные процедуры
3. Распараллеливание на системах с общей памятью. OpenMP для типичных ситуаций, возникающих в процессе разработки параллельной вычислительной программы

4. Распараллеливание на системах с общей памятью. Способы использования OpenMP для создания эффективных алгоритмов на вычислительных системах с общей памятью
5. Распараллеливание на системах с общей памятью. Типичные ошибки и способы их устранения при реализации параллельных алгоритмов на системах с общей памятью с использованием технологии OpenMP
6. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Основные понятия. Общие процедуры MPI
7. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Передача/прием сообщений между отдельными процессами
8. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Коллективные взаимодействия процессов
9. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Группы и коммутаторы
10. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Виртуальные топологии

Вопросы к экзамену:

1. Распараллеливание на системах с распределенной памятью. Пересылка разнотипных данных
2. Распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Графические процессоры с параллельной архитектурой. Устройство графических процессоров. Модель программирования. Структура памяти
3. Распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Технология CUDA
4. Распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Измерение производительности и метрики производительности
5. Распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Оптимизация
6. Распараллеливания на системах с вычислительными графическими платами. Программирование компьютера с несколькими GPU
7. Требования к параллельным алгоритмам и их реализации
8. Схема решения задачи. Хранение данных. Способы разбиения
9. Характеристики производительности: теоретический анализ и расчетные оценки
10. Балансировка нагрузки процессоров
11. Синхронизация шага по времени
12. Параллельные итерационные методы. Решения дифференциальных уравнений в частных производных. Общая структура
13. Параллельные итерационные методы. Метод Якоби. Метод Гаусса-Зейделя. Метод последовательной верхней релаксации. Сравнения различных подходов. Решение уравнения Пуассона. Течение в каверне
14. Параллельные итерационные методы. Решение уравнения Пуассона. Течение в каверне
15. Реализация метода Монте-Карло с использованием технологии CUDA
16. Реализация метода конечных разностей с использованием технологии CUDA
17. Распараллеливание отдельных частей вычислительного алгоритма
18. Реализация векторизованных алгоритмов решения краевых задач

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Параллельные итерационные методы. Метод Якоби. Метод Гаусса-Зейделя. Метод последовательной верхней релаксации. Сравнения различных подходов. Решение уравнения Пуассона. Течение в каверне.
2. Распараллеливание на системах с общей памятью. Типичные ошибки и способы их устранения при реализации параллельных алгоритмов на системах с общей памятью с использованием технологии OpenMP.

Пример 2.

1. Реализация метода Монте-Карло с использованием технологии CUDA.
2. Классификация современных высокопроизводительных вычислительных систем.

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится по результатам текущего контроля в семестре.

Устный экзамен проводится по билетам. При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.