

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Параллельное программирование для высокопроизводительных систем

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

**3. Направление подготовки:** 03.04.02 Физика (магистратура)

**4. Аннотация:**

Целью и задачей курса "Параллельное программирование для высокопроизводительных систем" является развитие в обучающемся базовых навыков параллельного программирования, необходимых при решении современных вычислительно ёмких прикладных задач математической физики. В частности, повышенное внимание уделяется решению базовых задач линейной алгебры, таким как, например, решение систем линейных алгебраических уравнений, к численному решению которых сводится решение большинства прикладных задач, сводящихся к интегральным уравнениям и уравнениям в частных производных. В курсе подробно рассматриваются подходы к параллельной реализации численного решения соответствующих задач, которые являются наиболее ресурсоёмкими подзадачами при решении интегральных уравнений и уравнений в частных производных. Итогом освоения курса обучающимся является написание параллельной программы для решения одного из уравнений математической физики. Реализация данных подходов рассматривается на примере одного из самых распространённых методов построения параллельных программ - технологии MPI, являющейся основным средством программирования для кластерных систем. Курс предусматривает множество демонстраций и индивидуальных практических заданий, иллюстрирующих основные разделы курса, для выполнения которых будет использоваться удалённый доступ к вычислительным ресурсам кафедры математики и/или суперкомпьютерного комплекса НИВЦ МГУ. Курс опирается на практические базисные курсы "Программирование" и "Численные методы". В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основные методы параллельного программирования и уметь использовать изученные методы при решении вычислительно ёмких прикладных задач.

**5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):**

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

## **6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

### НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

ИК-3, ИК-4, ПК-2, ПК-3, ОНК-5, ОНК-6, СК-1

### ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках общей дисциплины «Программирование». Желательно предварительное освоение дисциплин «Численные методы», «Дифференциальные уравнения» и «Интегральные уравнения».

## **7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе						
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
Основные понятия. Об идеях параллельного программирования и возможностях их использования. Технология MPI при написании параллельных версий программ.		1			1	1 час Знакомство с базовой литературой по теме параллельных вычислений [3, 4, 5].		1
Основы работы с кластерными системами, программирование которых основано на технологии MPI.			1		1	1 час Отработка запуска тестовых программ на многопроцессорных системах.		1

Прием сообщений между отдельными процессами. Прием/передача сообщений с блокировкой. Различные виды операторов MPI_Send и MPI_Recv.		1	1		2	1 час Написание тестовых программ, реализующих взаимодействия между различными процессорами посредством операций MPI_Send и MPI_Recv.		1
Особенности параллельного перемножения матрицы на вектор с использованием операторов MPI_Send и MPI_Recv.		1	1		2	2 часа Написание параллельной версии программы, реализующей перемножение матрицы на вектор с помощью операций MPI_Send и MPI_Recv для случая, когда число процессоров не согласовано с числом строк матрицы.		2
Коллективные взаимодействия процессоров. Функции MPI_Gather, MPI_Scatter и их вариации.		1	1		2	1 час Написание тестовых программ, реализующих коллективные взаимодействия процессоров посредством функций MPI_Gather, MPI_Scatter и их вариации.		1
Особенности параллельного перемножения матрицы на вектор с использованием функций коллективного		1	1		2	2 часа Написание параллельной версии программы,		2

взаимодействия процессоров.						реализующей перемножение матрицы на вектор с помощью операций коллективного взаимодействия процессоров для случая, когда число процессоров не согласовано с числом строк матрицы.		
Коллективные взаимодействия процессоров. Функция MPI_Reduce и её вариации.		1	1		2	1 час Написание тестовых программ, реализующих коллективные взаимодействия процессоров посредством функции MPI_Reduce и её вариаций.		1
Особенности параллельного перемножения транспонированной матрицы на вектор с использованием функций коллективного взаимодействия процессоров без непосредственного транспонирования исходной матрицы.		1	1		2	2 часа Написание параллельной версии программы, реализующей перемножение транспонированной матрицы на вектор с помощью операций коллективного взаимодействия процессоров для случая, когда число процессоров не согласовано с числом строк матрицы.		2

Метод сопряжённых градиентов для минимизации функционалов, возникающих при решении СЛАУ или задач оптимизации.		2			2	1 час Знакомство с базовой литературой по теме [6].		1
Особенности параллельной реализации метода сопряжённых градиентов.			1		1	5 часов Написание параллельной версии программы, реализующей метод сопряжённых градиентов.		5
Контроль эффективности программной реализации параллельных алгоритмов. Пакет Intel Trace Analyzer.		2			2	1 час Знакомство с базовой литературой по теме [3, 4, 5].		1
Применение пакета Intel Trace Analyzer для сравнения эффективности программных реализаций метода сопряжённых градиентов, реализованного с помощью операций типа «точка-точка» и операций коллективного взаимодействия между процессорами.			1		1	2 часа Тестирование эффективности программных реализаций параллельного метода сопряжённых градиентов.		2
Базовые подходы к решению нелинейных дифференциальных уравнений.		2			2	2 часа Знакомство с базовой литературой по теме [6].		2
Метод прогонки для решения систем линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей. Параллельная версия метода прогонки.			3		3	2 часа Знакомство с базовой литературой по теме [3, 4, 5].		2
Прием/передача сообщений без блокировки. Различные виды операторов Wait и Test.			1		1	1 час Написание тестовых программ, реализующих		1

						приём/передачу сообщений между процессорами без блокировки.		
Отложенные взаимодействия. Предотвращение тупиковых ситуаций, совмещенные прием и передача сообщений. Барьерная синхронизация.			1		1	1 час Написание тестовых программ, реализующих приём/передачу сообщений с помощью функции совмещённой приёма и передачи сообщений.		1
Особенности применения асинхронных операций для реализации параллельной версии метода прогонки.			1		1	5 часов Написание параллельной версии метода прогонки и применение его к решению одного из дифференциальных уравнений в частных производных		5
Группы и коммутаторы. Виртуальные топологии.		2			2	1 час Написание тестовых программ по теме.		1
Промежуточная аттестация - зачет			4	2 часа Коллоквиум по пройденным темам	6	4 часа Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).		4
<b>Итого</b>		18	16	2	36			36

\* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

## **8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:**

8.1 Основная и дополнительная литература доступна студентам через Интернет или по запросу лектору.

## **9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Функции взаимодействия между процессорами типа «точка-точка».
2. Функции коллективного взаимодействия между процессорами.
3. Распараллеливание перемножения матрицы на вектор.
4. Распараллеливание перемножение транспонированной матрицы на вектор без непосредственного транспонирования исходной матрицы.
5. Параллельная версия метода сопряжённых градиентов.
6. Параллельная версия метода прогонки и её вариаций.
7. Контроль эффективности программной реализации параллельного алгоритма.

Типовые вопросы к зачету:

1. Функции взаимодействия между процессорами типа «точка-точка».
2. Функции коллективного взаимодействия между процессорами.
3. Распараллеливание перемножения матрицы на вектор.
4. Распараллеливание перемножение транспонированной матрицы на вектор без непосредственного транспонирования исходной матрицы.
5. Параллельная версия метода сопряжённых градиентов.
6. Параллельная версия метода прогонки и её вариаций.
7. Контроль эффективности программной реализации параллельного алгоритма.

## **ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)**

ИК-3, ИК-4, ПК-2, ПК-3, ОНК-5, ОНК-6, СК-1



**ВЛАДЕТЬ:** профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).

**УМЕТЬ:** анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

**УМЕТЬ:** осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).

**УМЕТЬ:** организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

**ЗНАТЬ:** методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (З1, СПК-1).

**ЗНАТЬ:** способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (З2, СПК-2).

**ЗНАТЬ:** методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (З3, СПК-3).

Планируемые результаты	Критерии оценивания результатов обучения
------------------------	--

обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (B1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (B2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем,	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих

при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (ВЗ, СПК-3).		планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений
<i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов

<p><i>УМЕТЬ:</i> осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>
<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>

<p><i>ЗНАТЬ:</i> методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (31, СПК-1)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>
<p><i>ЗНАТЬ:</i> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>

<b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования
--	-------------------	--	--	--	---

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

1. Антонов А.С. "Параллельное программирование с использованием технологии MPI". - М.: Изд-во МГУ, 2004. - 71 с.
2. Антонов А.С. "Введение в параллельные вычисления". - М.: Изд-во МГУ, 2002. - 69 с.

### Дополнительная литература

3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. "Параллельные вычисления" - СПб.: БХВ-Петербург, 2002. - 608 с.
4. Lewis T.G. Foundation of parallel programming: machine-independent approach. IEEE Computer Society Press, 1994. – 282 p.
5. Воеводин В.В. "Вычислительная математика и структура алгоритмов". - М.: Изд-во МГУ, 2006. - 112 с.
6. Калиткин Н.Н. Численные методы. "БХВ-Петербург", Санкт-Петербург, 2 издание. 2011г, (электронная книга доступна бесплатно) <http://www.imamod.ru> в разделе "Публикации".

## 11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

- <http://www.parallel.ru>

## **12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра.

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

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Параллельное программирование для высокопроизводительных систем» лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования. При написании программных версий параллельных алгоритмов используется удалённый доступ к вычислительным ресурсам кафедры математики и суперкомпьютерного комплекса НИВЦ МГУ.

## **14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащённая проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской.