

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФНИЦ «КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА» РАН)

Принято на Ученом совете
ИПЛИТ РАН – филиала
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Протокол № 4/2020 от 24 сентября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН



О.А. Алексеева

« 24 » сентября 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
учебной дисциплины
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЛАЗЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

направление подготовки **11.06.01** Электроника, радиотехника и системы связи
направленность Квантовая электроника (**05.27.03**)

Квалификация
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Шатура
2020

Бри... *Алексеева*

1. Цели и задачи дисциплины

Целью освоения дисциплины «Математическое моделирование лазерных процессов» является овладение современными профессиональными знаниями в области квантовой электроники, связанной с разработкой лазерных микро- и макротехнологий обработки материалов и предсказательным моделированием возникающих при этом физических процессов.

Задачи дисциплины:

- изучение физических основ лазерных технологий сварки, резки, лазерной обработки порошковых дисперсных сред;
- рассмотрение основных механизмов глубокого проплавления металлов при мощном лазерном воздействии;
- изучение влияния нелинейных явлений, сопровождающих глубокое проникновение мощного лазерного излучения в гетерогенные конденсированные среды;
- моделирование процессов при лазерном сплавлении микро- и нанопорошков;
- изучение лазерно-индуцированных упорядоченных структур и примеров их практического применения.

2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы аспирантуры

Дисциплина «Математическое моделирование лазерных процессов» (индекс Б1.В.ДВ.1) относится к вариативной части программы подготовки аспирантов по направлению подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи (направленность 05.27.03 Квантовая электроника).

Дисциплина после выбора должна быть освоена аспирантом обязательно (но не обязательно в период обучения, отмеченный в базовом учебном плане).

3. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины

Освоение дисциплины «Математическое моделирование лазерных процессов» направлено на формирование следующих универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций аспиранта:

УК-1 (способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях);

ОПК-1 (владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности);

ОПК-2 (владение культурой научного исследования, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий);

ПК-1 (способность проводить научные исследования и технические разработки лазеров, приборов, систем и комплексов с использованием лазерного излучения, материалов, элементно-узловой базы, технологий и специального оборудования с целью развития лазерной техники и лазерных информационных и фотонных технологий и их применения в различных отраслях науки, технике, медицине).

4. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины «Математическое моделирование лазерных процессов» аспирант должен

знать:

- перспективные направления исследований в области применения лазерного излучения (ЛИ) в науке и микро-и макротехнологиях обработки материалов;

- основные особенности взаимодействия мощного ЛИ с металлами (образование глубокой каверны, многократное переотражение излучения в каверне, возникновение давления отдачи паров);
- основные виды и механизмы гидродинамических неустойчивостей (испарительно-капиллярной, термо-капиллярной, концентрационно-капиллярных) в каверне глубокого проплавления металлов и сплавов;
- основные физические механизмы лазерного сплавления одно-и многокомпонентных микро- и нанопорошков для аддитивных производств функциональных изделий;
- особенности моделирования напряженно-деформационных состояний изделий, синтезируемых методом лазерного сплавления порошков (наличие плавления, скачкообразные температурные зависимости упругих модулей, фазовые напряжения);
- основные механизмы лазерно-индуцированных неустойчивостей и самоорганизации микро- и наноструктур на поверхности и в объеме твердых тел с генерацией носителей беспорядка;
- области практического использования лазерно-индуцированных периодических структур,

уметь:

- оценить результаты влияния ЛИ заданной интенсивности и частоты на различные материалы;
- пояснить и теоретически описать механизмы поглощения энергии ЛИ в металлах в режиме каналированного проникновения;
- пояснить и теоретически описать механизмы возникновения различных деформационно-концентрационных поверхностных неустойчивостей и самоорганизации периодических структур в металлах и полупроводниках при лазерных воздействиях с генерацией структурных дефектов;
- пояснить и теоретически описать механизмы возникновения гидродинамических неустойчивостей и их различных проявлений (концентрационное расслоение, кольцевые периодические структуры) при глубоком проплавлении металлов и сплавов;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач лазерной обработки дисперсных порошковых материалов;
- планировать оптимальное проведение физического эксперимента,

владеть:

- навыками расчета и измерения параметров нагрева, плавления и испарения различных сред;
- методами нахождения дисперсионных уравнений лазерно-индуцированных поверхностных неустойчивостей металлов и полупроводников и критических условий их возникновения (критическая длина волны, инкремент нарастания, порог накачки);
- методами определения дисперсионных соотношений лазерно-индуцированных гидродинамических неустойчивостей и критических условий их возникновения (пороговая интенсивность излучения, максимальная скорость роста, критическая длина);
- навыками постановки физических задач в области физики взаимодействия ЛИ с порошковыми дисперсными материалами;
- навыками расчета формирования микроструктуры и дефектов изделий, синтезируемых методом лазерного сплавления порошков.

5. Планируемые результаты обучения по дисциплине

(заполняется в соответствии с картами компетенций)

Формируемые компетенции (код компетенции, уровень освоения)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1	З1 (УК-1) Знать методы критического анализа и оценки современных достижений в выбранной области квантовой электроники, а так-

	<p>же методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>У1 (УК-1) Уметь анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов.</p> <p>В1 (УК-1) Владеть навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</p>
ОПК-1	<p>З1 (ОПК-1) Знать методики анализа современных проблем, способы и методы решения теоретических и экспериментальных задач в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>У1 (ОПК-1) Уметь обоснованно выбирать и применять расчетно-теоретические методы для разработки физических и математических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>У2 (ОПК-1) Уметь обоснованно выбирать и применять экспериментальные методы исследования для решения научных задач в выбранной области квантовой электроники.</p> <p>В1 (ОПК-1) Владеть современными методами теоретических и экспериментальных исследований для решения задач в выбранной области профессиональной деятельности.</p>
ОПК-2	<p>З1 (ОПК-2) Знать современные информационные технологии, программные продукты и ресурсы сети Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p> <p>У1 (ОПК-2) Уметь использовать профессионально-профилированные знания в области современных информационных технологий, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p> <p>В1 (ОПК-2) Владеть навыками поиска (в том числе с использованием новейших информационных систем и баз данных) и критического анализа научной и технической информации по тематике проводимых исследований.</p> <p>В2 (ОПК-2) Владеть навыками использования знаний в области информационных технологий, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности.</p>
ПК-1	<p>З1 (ПК-1) Знать современное состояние науки в области квантовой электроники, тенденции развития фундаментальных исследований и прикладных разработок лазеров и лазерных информационных и фотонных технологий, цели и задачи научных исследований в выбранной области, базовые принципы и методы их организации.</p> <p>З2 (ПК-1) Знать физические и конструкционные особенности лазеров разных типов, современные материалы, компоненты, лазерное диагностическое и технологическое оборудование, технологические процессы производства.</p> <p>У1 (ПК-1) Уметь проводить теоретические и экспериментальные исследования, включающие математическое и компьютерное моделирование, проектирование, конструирование, использование и эксплуатацию материалов, компонентов, приборов, устройств, установок квантовой электроники различного функционального назначения, лазерного технологического и диагностического оборудования.</p> <p>В2 (ПК-1) Владеть навыками исследования, моделирования, проектирования, конструирования и практического применения материалов, компонентов, приборов, устройств, установок квантовой электроники различного функционального назначения, лазерного технологического и диагностического оборудования.</p>

6. Структура и содержание дисциплины

6.1. Структура дисциплины

Вид работы	Семестр			Всего
	3-4			
Общая трудоёмкость, акад. часов	144			144
Аудиторная работа:	32			32
Лекции, акад. часов	16			16
Практические занятия, акад. часов	16			16
Лабораторные работы, акад. часов	-			-
Самостоятельная работа, акад. часов	108			108
Индивидуальные занятия, акад. часов	-			-
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен) - ЗАЧЕТ	4			4

6.2. Разделы дисциплины

№ раздела	Наименование раздела	Аудиторная работа, трудоёмкость (акад. часов)	Самостоятельная работа, трудоёмкость (акад. часов)
1	Лазерные микро- и макротехнологии обработки материалов	2	10
2	Гидродинамические и нелинейные явления в конденсированных средах под действием мощного лазерного излучения	12	30
3	Лазерное сплавление одно- и многокомпонентных микро- и нанопорошков	14	20
4	Лазерно-индуцированные неустойчивости и формирование микро- и наноструктур на поверхности и в объеме твердых тел	4	20
	Итоговая аттестация (зачет)	4	28
	<i>Общая трудоёмкость</i>	36	108

6.3. Лекции

№ раздела	№ лекции	Тематика	Трудоёмкость (акад. часов)
1	1	(Обзорно-установочная лекция) <i>Лазерные микро- и макротехнологии обработки материалов.</i> Вводные замечания. Физические основы лазерной сварки и резки. Технология лазерной обработки порошковых дисперсных сред. Селективное лазерное спекание и наплавка порошков. Микроструктурные процессы в твердых телах при лазерном воздействии: образование точечных дефектов и их кластеризация.	2
2	2	<i>Гидродинамические явления при формировании каверны глубокого проплавления в металлах при мощном лазерном воздействии.</i> Основные механизмы глубокого проплавления. Испари-	2

		тельные и термокапиллярные механизмы. Образование приповерхностной плазмы.	
2	3	Гидродинамические неустойчивости при глубоком лазерном проплавлении металлов. Механизмы положительной обратной связи. Испарительно-капиллярная неустойчивость парогазовой каверны. Дисперсионные соотношения. Роль термокапиллярного эффекта. Эффекты самоорганизации периодических структур в каверне.	2
2	4	Нелинейные явления, сопровождающие глубокое проникновение мощного лазерного излучения в гетерогенные конденсированные среды. Капиллярно-термо-концентрационная неустойчивости и их проявления. Эффекты периодического концентрационного расслоения гетерогенных сред. Центробежные эффекты расслоения гетерогенных систем из несмешиваемых компонентов. Влияние вихревых движений расплава на сепарацию частиц несмешивающихся компонентов.	2
3	5	Лазерное сплавление (ЛС) одно-и многокомпонентных микро- и нанопорошков. Рассеяние и поглощение излучения при прохождении через порошковые среды. Уравнения нагрева и плавления движущейся частицы. Уравнения тепло - массопереноса и гидродинамики двухфазной среды. Уравнения свободной поверхности.	2
3	6	Моделирование эволюции микроструктуры синтезируемого объекта методом ЛС. Гомогенные и гетерогенные механизмы нуклеации. Кинетическое уравнение Колмогорова для фазовых превращений (плавления и кристаллизации) в неоднородных конденсированных системах. Тепловые и конверсионные поля при ЛС. Метод фазового поля.	2
3	7	Моделирование напряженно-деформационных состояний наплавленного валика при ЛС. Особенности моделирования напряженно-деформационных состояний в присутствии фазовых превращений. Разрывные зависимости свойств материала от температуры. Конститутивные соотношения упругости. Формулировка уравнения равновесия. Остаточные упругие напряжения и механизмы их возникновения. Термоупругость. Термопластичность.	2
4	8	Лазерно-индуцированные неустойчивости и формирование микро- и наноструктур на поверхности и в объеме твердых тел. Механизмы беспорядок-деформационного взаимодействия. Концентрационно-упругие неустойчивости. Дисперсионные уравнения. Самоорганизация локализованных и пространственно-периодических концентрационно-деформационных структур. Термо-деформационные структуры. Практическое применение лазерно-индуцированных упорядоченных структур.	2
Общая трудоемкость лекций:			16

6.4. Практические занятия

№ раздела	№ практического занятия	Тематика	Трудоёмкость (акад. часов)
2	1	Расчет геометрических характеристик (глубины и ширины) кавер-	2

		ны глубокого проплавления в зависимости от свойств ЛИ (мощность, длительность, скорость сканирования) и среды.	
3	2	Оценка влияния аэродинамических сил на перенос порошка при СЛС. Роль типа и фазового состава частиц. Расчет распределения полей скоростей, температуры и концентрации инжектируемых частиц. Массовая скорость инжектируемых частиц. Теплофизические и оптические характеристики порошковых сред.	2
2	3	Оценка порогов возникновения испарительно-капиллярных и термокапиллярных неустойчивостей в каверне глубокого проплавления.	2
2	4	Оценка условий гидродинамического расслоения несмешивающихся компонентов после затвердевания расплава в отсутствие сканирования лазерного пучка.	2
3	5	Оценка влияния распределения частиц порошка на плотность источника тепла на поверхности и геометрические характеристики спекаемого слоя (ширина, высота, профиль). Определение эффективности поглощения порошков.	2
3	6	Сравнительная оценка скоростей нуклеации и роста частиц новой фазы для различных механизмов нуклеации (гомогенный, гетерогенный). Особенности нуклеации наночастиц. Размерные эффекты.	2
3	7	Расчет упругих свойств (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, предела текучести) в области высоких температур и с учетом фазовых превращений (плавления). Вывод динамических уравнений упругости.	2
4	8	Расчет влияния упругих полей деформаций на скорости образования и рекомбинации лазерно-индуцированных дефектов. Определение деформационно-индуцированного дрейфа дефектов.	2
Общая трудоемкость практических занятий:			16

6.5. Самостоятельные занятия

№ раздела	Вид самостоятельной работы	Трудоёмкость (акад. часов)
1	Работа с лекционным материалом Решение задач по заданию преподавателя Решение задач на тему: Лазерная сварка и резка с глубоким проплавлением. Самостоятельный расчет: а) пороговых интенсивностей ЛИ для образования глубокой каверны; б) гидродинамических сил, действующих в каверне. Самостоятельное изучение темы: Лазерная обработка тонкопленочных элементов и основные сферы их применения. Самостоятельное изучение зависимостей геометрических характеристик сварного шва от режимов проведения процесса (мощность, сканирования, диаметр пятна). Самостоятельное ознакомление с программами для расчета температурных распределений при лазерной резке и сварке с глубоким проплавлением.	10
2	Работа с лекционным материалом Решение задач по заданию преподавателя Решение задач на тему: Гидродинамические и нелинейные явления в конденсированных средах под действием мощного ЛИ.	30

	<p>Самостоятельный расчет пространственных масштабов периодических структур рельефа, формирующихся в результате различных гидродинамических неустойчивостей.</p> <p>Самостоятельное изучение темы: Центробежные эффекты расслоения при воздействии сканирующих лазерных пучков на гетерогенные системы из несмешивающихся компонентов.</p> <p>Самостоятельное изучение зависимости пространственных масштабов периодических структур рельефа от характеристик ЛИ и свойств среды.</p> <p>Самостоятельное ознакомление с программами для расчета температурных и гидродинамических полей при формировании парогазовой каверны</p>	
3	<p>Работа с лекционным материалом</p> <p>Решение задач по заданию преподавателя</p> <p>Решение задач на тему: Лазерное сплавление одно-и многокомпонентных микро- и нанопорошков.</p> <p>Самостоятельный расчет, на качественном уровне, геометрических характеристик (глубина, высота, профиль) наплавленного валика при ЛС с инжекцией порошков.</p> <p>Самостоятельное изучение темы: Влияние режимов проведения процесса на микроструктурные свойства и деформационные состояния синтезируемых материалов.</p> <p>Самостоятельное изучение зависимости геометрических характеристик наплавленного валика от режимов проведения процесса (скорость подачи порошка, мощность, скорость сканирования).</p> <p>Самостоятельное ознакомление с программами для расчета температурных и конверсионных полей в зоне ЛС с инжекцией порошков</p>	20
4	<p>Работа с лекционным материалом</p> <p>Решение задач по заданию преподавателя</p> <p>Решение задач на тему: Лазерно-индуцированные неустойчивости и формирование микро- и наноструктур на поверхности и в объеме твердых тел</p> <p>Самостоятельный расчет пороговых значений параметра накачки, инкремента роста и пространственного масштаба концентрационно-деформационных структур.</p> <p>Самостоятельное изучение темы: Влияние нелокального беспорядок-деформационного взаимодействия на формирование периодических структур на поверхности твердых тел и в тонких слоях на субстрате.</p> <p>Самостоятельное изучение зависимостей параметра и профиля упорядоченных структур от условий лазерного воздействия (параметра накачки) и свойств среды.</p> <p>Самостоятельное ознакомление с программами для расчета основных характеристик (амплитуда, профиль) локализованных и пространственно-периодических упорядоченных структур</p>	20
	Подготовка к итоговой аттестации (зачету)	28
Общая трудоемкость самостоятельной работы:		108

Руководитель дисциплины оставляет за собой право уточнять тематику и форму проведения аудиторных занятий.

Основная часть работы аспиранта является самостоятельной и включает изучение рекомендованной руководителем дисциплины литературы, работу с источниками, написание текстов, составление и защиту презентаций, подготовку к итоговой аттестации и т.п.

По согласованию с руководителем дисциплины возможно проведение индивидуальных консультаций и собеседования с руководителем дисциплины.

В случае отсутствия аудиторных занятий или невозможности их посещать руководитель дисциплины предлагает аспиранту соответствующую отработку с тем же объемом оценки проделанной работы.

7. Аттестационные критерии

От аспиранта требуется посещение занятий, выполнение заданий руководителя дисциплины, знакомство с рекомендованной литературой, по согласованию с научным руководителем возможна подготовка зачетной письменной работы (реферата, аналитической записки, обзора источников или литературы и т.п.). При аттестации аспиранта оценивается качество работы на занятиях (умение вести научную дискуссию, способность четко и ёмко формулировать свои мысли), уровень подготовки к самостоятельной научно-исследовательской деятельности в избранной области, качество выполнения заданий (презентаций, докладов, аналитических записок и др.).

8. Требования к итоговой аттестации по дисциплине

Итоговая аттестация для дисциплины проводится в форме зачета.

Условия аттестации, а также вопросы для повторения (контрольные вопросы) и задания руководителя дисциплины определяются в начале курса. Обучающийся должен показать владение предметом, знание рекомендованных статей и монографий, материалов конференций и т.п., умение выполнять устные и письменные задания руководителя дисциплины.

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

9.1. Перечень и карта компетенций дисциплины «Математическое моделирование лазерных процессов»

Универсальные компетенции						Общепрофессиональные компетенции					Профессиональные компетенции	
УК-1	УК-2	УК-3	УК-4	УК-5	УК-6	ОПК-1	ОПК-2	ОПК-3	ОПК-4	ОПК-5	ПК-1	ПК-2
+						+	+				+	

Критерии оценивания компетенций приведены в основной образовательной программе высшего образования – программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, направленность 05.27.03 Квантовая электроника.

9.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

9.2.1. Контрольные вопросы для сдачи зачета

1. Какие физические процессы ответственны за образование глубокой парогазовой каверны?
2. В чем суть испарительно-капиллярного механизма образования глубокой каверны?
3. В чем суть термокапиллярного и испарительно-капиллярного механизмов возникновения неустойчивостей в каверне?
4. Назовите механизмы обратных связей неустойчивостей в каверне.

5. Какие известны сферы применения лазерной обработки тонкопленочных элементов?
6. Поясните механизмы самоорганизации поверхностных деформационно-концентрационных периодических структур в твердых телах.
7. Какие известны проявления лазерно-индуцированных гидродинамических неустойчивостей?
8. От чего зависит пространственный масштаб упорядоченных деформационно-концентрационных поверхностных структур?
9. В чем суть центробежного механизма расслоения при воздействии сканирующих лазерных пучков на гетерогенные системы из несмешивающихся компонентов?
10. Поясните механизмы лазерного спекания металлических порошков.
11. Как влияет скорость сканирования на геометрические характеристики валика (глубина, высота, ширина) при ЛС с инъекцией порошков?
12. В чем суть метода селективного лазерного спекания порошков?
13. Как влияет скорость подачи порошка на геометрические характеристики валика (глубина, высота, ширина) при ЛС с инъекцией порошков?
14. Зависят ли геометрические характеристики валика (глубина, высота, ширина) при ЛС от мощности луча?
15. От чего зависит эффективность захвата порошков при ЛС?
16. Что является целью решения задачи Стефана в случае чистых металлов?
17. В чем суть метода фазового поля для кристаллизации расплавов?

10. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Обязательная литература

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок // Под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
2. Шишковский И.В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
3. Гладуш Г.Г., Смуров И.Ю. Физические основы лазерной обработки материалов М.: ФИЗМАТЛИТ. 2017. 592 с.
4. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения // Под ред. В.Я. Панченко. М.: Интерконтакт Наука, 2009. С. 64-90.
5. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов // Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 504 с.
6. Современные лазерно-информационные технологии: кол. моногр. под ред. В.Я. Панченко, Ф.В. Лебедева – М.: Интерконтакт Наука, 2015, С.324-344
7. Введенев А.А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов.- Л.: Машиностроение, 1986

Дополнительная литература

1. Углов А.А., Смуров И.Ю., Лапшин А.М., Гуськов А.Г. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. М.: Наука, 1991. 288 с.
2. Мирзаде Ф.Х. Кинетика нуклеации кластеров и формирование наноструктур в конденсированных системах. Современные лазерно-информационные и лазерные технологии // Под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 62–78.
3. Мирзаде Ф. Х., Панченко В. Я. Шелепин Л. А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН, 1996. Т. 165, №1. С. 3-33.

4. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А. и др. Воздействие лазерного излучения на материалы. М.: Наука, 1989.
5. Емельянов В. И. Самоорганизация упорядоченных дефектно-деформационных микро- и наноструктур на поверхности твердых тел под действием лазерного излучения (обзор) // Квантовая электроника, 1999. Т. 28 , №1. С. 2-28.

Периодические издания, электронные ресурсы, включая доступ к базам данных и т.п.:

РИНЦ	https://elibrary.ru/orgs.asp
Web of Science	http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=General-Search&SID=F2LiEv3BvmxwoCqmOmV&preferencesSaved=
Scopus	https://www.scopus.com/home.uri
Google Scholar citations	https://scholar.google.ru/citations?user=NbJEoV8A-AAAJ&hl=ru
IOP Institute of Physics материалы компании IOP Publishing Limited, а именно, база данных IOP Journal	http://www.iop.org/
AIP материалы компании American Institute of Physics	https://www.aip.org/
CASC материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных CASC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases
APS Журналы Американского физического общества база данных APS Online Journals	https://www.aps.org/
IEEE материалы компании The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, а именно, база данных IEEE/IEL	http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
RSC материалы Royal Society of Chemistry	http://pubs.rsc.org/
Wiley материалы компании John Wiley & Sons Ltd., а именно база данных Wiley Journals	http://onlinelibrary.wiley.com/
Inspec материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных INSPEC	https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-and-services/research-databases/inspec
ProQuest материалы компании и PROQUEST LLC, а именно база	https://www.proquest.com/products-services/pqdtglobal.html

данных Proquest Dissertations and Theses Global	
SpringerNature Зарубежные электронные ресурсы издательства, а именно: Springer Journals Springer Protocols Springer Materials Springer Reference zbMATH Nature Journals Nano Database	http://link.springer.com/ http://www.springerprotocols.com/ http://materials.springer.com/ http://link.springer.com/search?facet-content-type=%22ReferenceWork%22 http://zbmath.org/ http://npg.com/ https://nano.nature.com
Elsevier B.V. Science Direct Complete Freedom Collection зарубежные электронные ресурсы издательства Elsevier «Freedom Collection» и коллекция электронных книг «Freedom Collection eBook collection», размещенных на платформе Science Direct	https://www.elsevier.com/
CCDC - Cambridge Crystallographic Data Centre Зарубежные электронные ресурсы Кембриджского центра структурных данных	https://www.ccdc.cam.ac.uk/
Scifinder База данных	https://scifinder.cas.org

11. Образовательные технологии

Курс имеет электронную версию для презентации. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

12. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет, учебная доска.

При проведении расчетов может быть использовано специальное оборудование:

- Суперкомпьютерный кластер на базе АПК-1 и АПК-1М2 (ВНИИЭФ, Саров) с производительностью до 5ТФлопс;

- Программное обеспечение собственной разработки для численного моделирования на базе открытого пакета вычислительной гидродинамики OpenFoam;

- Академическая лицензия на коммерческий пакет вычислительной гидродинамики Ansys Fluent.

Программу составил:

д.ф.-м.н. Ф.Х. Мирзаде