

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ ИМ. Л.Ф. ВЕРЕЩАГИНА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФВД РАН)

ПРИНЯТО

На Ученом совете ИФВД РАН  
Протокол № 6 от 30.11.2020



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Теория упругости»  
наименование

Направление подготовки	<b>03.06.01 Физика и астрономия</b>
Направленность (профиль) ООП	<b>«Физика конденсированного состояния» (01.04.07)</b>
Квалификация	<b>«Исследователь. Преподаватель- исследователь»</b>
Форма обучения	<b>очная</b>
Год приема	<b>2020</b>

Москва – 2020

Программа дисциплины «Теория упругости» разработана на основании следующих нормативных документов:

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования, утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от «30» июля 2014 г № 876. по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», с изменениями и дополнениями от 30 апреля 2015 г;

- Программа кандидатского минимума и паспорт научной специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния, разработанный экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства в связи с утверждением приказа Министерства образования и науки Российской Федерации от «23» октября 2017 г. № 1027 «Об утверждении Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученыe степени».

Составитель: д.ф.-м.н. Михеенков А.В.

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

1.1. Целью освоения аспирантами дисциплины «Теория упругости» является дать аспирантам углубленные знания и методы решения задач, возникающих при изучении деформирования твердых тел при достаточно малых нагрузках. Особое внимание уделено описанию базовых понятий, которые будут использоваться в последующих курсах, а также вариационных принципов и методов решения плоской задачи.

1.2. Задачи освоения дисциплины:

- ознакомить аспирантов с важнейшими разделами теории упругости и ее применением для решения практических задач;
- рассмотреть основные фундаментальные теоремы теории упругости, характеризующие присущие только этой теории особенности;
- продемонстрировать вытекающие из основных теорем методы и алгоритмы решения задач.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ**

2.1. Учебная дисциплина «Теория упругости» входит в Блок (Обязательные дисциплины) и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, направленность «Физика конденсированного состояния» (01.04.07). Индекс дисциплины по учебному плану — Б1.В.ОД.4. Дисциплина изучается на 1 курсе.

2.2. Актуальность курса обусловлена большой практической значимостью физических явлений в конденсированных средах и необходимостью создания различного рода устройств и приборов, основанных на использовании явлений в твёрдых телах, гетерогенных структурах и кристаллах. Изучение данной дисциплины базируется на следующих дисциплинах подготовки бакалавров, специалистов или магистров: «Физика», «Химия», «Кристаллография», «Физика твердого тела», «Информатика», «Программирование».

В результате освоения дисциплины «Теория упругости» обучающийся должен:

**Знать:**

- корректную постановку физической задачи теории упругости (основные уравнения и граничные условия);
- свойства и модели упругого тела.

**Уметь:**

- использовать полученные теоретические знания при решении практических задач, относящихся к области механики деформируемого твердого тела.

**Владеть:**

- современными методами и подходами в исследовании упругого деформирования;
- современными методами и подходами в исследовании упругого деформирования;
- навыками работы с литературой по применению математических методов решения различных задач теории упругости;
- -навыками самостоятельной работы в лаборатории, в библиотеке и Интернете;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

2.3. Основные положения дисциплины могут быть использованы в дальнейшем при прохождении научно-исследовательской практики и государственной итоговой аттестации.

### **3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Теория упругости» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО и ООП ВО по данному направлению подготовки:

- а) универсальных (УК-1, УК-3);
- б) общепрофессиональных (ОПК-1);
- в) профессиональных (ПК-1, ПК-2, ПК-3).

**Таблица 1.  
Декомпозиция результатов обучения**

Код компетенции	Планируемые результаты освоения дисциплины		
	Знать (1)	Уметь (2)	Владеть (3)
<b>УК-1</b>	ИУК-1.1.1 о современных научных достижениях, генерировании новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	ИУК-1.2.1 проявлять способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	ИУК-1.3.1 способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
<b>УК-3</b>	ИУК-3.1.1 об участии в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач	ИУК-3.2.1 принимать участие в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач	ИУК-3.3.1 готовностью участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач
<b>ОПК-1</b>	ИОПК-1.1.1 о способности самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием	ИОПК-1.2.1 самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных	ИОПК-1.3.1 способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием

	современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
<b>ПК-1</b>	ИПК-1.1.1 о применении современных и перспективных методов исследования и решении профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития области науки в соответствии с направленностью программы	ИПК-1.2.1 самостоятельно проводить научно-исследовательскую работу с применением современных и перспективных методов исследования и решать профессиональные задачи с учетом мировых тенденций развития области науки в соответствии с направленностью программы	ИПК-1.3.1 способностью к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы с применением современных и перспективных методов исследования и решению профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития области науки в соответствии с направленностью программы
<b>ПК-2</b>	ИПК-2.1.1 о способности анализировать результаты научных исследований и представлять их в виде докладов, статей, готовности применять на практике навыки составления и оформления научных отчетов и научно-технической документации	ИПК-2.2.1 анализировать результаты научных исследований и представлять их в виде докладов, статей, применять на практике навыки составления и оформления научных отчетов и научно-технической документации	ИПК-2.3.1 способностью анализировать результаты научных исследований и представлять их в виде докладов, статей, готовностью применять на практике навыки составления и оформления научных отчетов и научно-технической документации
<b>ПК-3</b>	ИПК-3.1.1 о способности использовать профессионально-профицированные навыки и знания в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов	ИПК-3.2.1 использовать профессионально-профицированные навыки и знания в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов	ИПК-3.3.1 способностью использовать профессионально-профицированные навыки и знания в области информационных технологий, программного обеспечения и ресурсов сети Интернет для обработки и анализа полученных научных результатов

Профессиональные компетенции выпускника программы аспирантуры по направлению подготовки «Физика и астрономия», направленность «Физика конденсированного состояния» 01.04.07 осваиваются в течение всего периода обучения в рамках дисциплин вариативной части и научно-исследовательской практики независимо от формирования других компетенций, и

обеспечивают реализацию обобщенной трудовой функции «Проводить научные исследования и реализовывать проекты». Для того чтобы формирование профессиональных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен:

**ЗНАТЬ:** возможные сферы и направления профессиональной самореализации; основные современные тенденции развития науки в области теории упругости; основные понятия теории упругости.

**УМЕТЬ:** вырабатывать на основе рационального анализа экспериментальных результатов свою точку зрения в вопросах описания деформирования твердых тел и отстаивать ее во время дискуссии со специалистами и неспециалистами; читать и реферировать научную литературу в области теории упругости; оценивать свои возможности, реалистичность и адекватность намеченных способов и путей достижения планируемых целей; отбор материала, характеризующего достижения в программном обеспечении и теории с учетом специфики направления подготовки.

**ВЛАДЕТЬ:** основными методами решения краевых задач, иметь представление об основных понятиях коммерческих программных продуктов.

#### **4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, в том числе 32 часа, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (из них 16 часов – лекции, 16 часов – практические, семинарские занятия), 72 часа – на самостоятельную работу обучающихся и 4 часа – на контроль.

**Таблица 2.**  
**Структура и содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела, темы	Семестр	Неделя семестра	Контактная ра- бота (в часах)			Самостоят. ра- бота	Контроль	<b>Формы текущего кон- троля успеваемости (по темам)</b>  <b>Форма промежуточной аттестации (по семестрам)</b>
				Л	ПЗ	ЛР			
1	Теория деформаций.	1	6-8	2			8		участие аспирантов в научных семинарах
2	Теория напряжений.	1	9-11	2	2		8		представление докладов на научные конференции
3	Уравнения линейной теории упругости.	1	12-14	2	2		8		подготовка научных статей
4	Общие теоремы и вариационные принципы.	1	15-17	2	2		8		подготовка презентаций по литературе и по теме исследований
5	Задача Сан-Венана.	2	20-23	2	2		8		освоение новых средств автоматизации и компьютеризации выполняемых научных исследований
6	Динамические задачи.	2	24-27	2	2		8		участие аспирантов в научных семинарах
7	Плоская задача. Общие формулы.	2	28-31	2	2		8		представление докладов на научные конференции

8	Методы решения плоской задачи.	2	32-35	2	2		8		подготовка научных статей
9	Трехмерные статические задачи.	2	36-39		2		8		подготовка презентаций по литературе и по теме исследований
10	Зачет.	2	40					4	проведение зачета
<b>ИТОГО</b>				<b>16</b>	<b>16</b>		<b>72</b>	<b>4</b>	<b>ЗАЧЕТ</b>

Условные обозначения:

Л – занятия лекционного типа; ПЗ – практические занятия, ЛР – лабораторные работы;

СР – самостоятельная работа по отдельным темам

**Таблица 3.**  
**Матрица соотнесения разделов, тем учебной дисциплины и формируемых в них компетенций**

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции						Общее количество компетенций
		УК-1	УК-3	ОПК-1	ПК-1	ПК-2	ПК-3	
Тема 1	10	+	+	+	+	+	+	6
Тема 2	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 3	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 4	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 5	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 6	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 7	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 8	12	+	+	+	+	+	+	6
Тема 9	10	+	+	+	+	+	+	6
Тема 10	4	+	+	+	+	+	+	6
<b>Итого</b>	<b>108</b>							

### Содержание тематических разделов

#### **Тема 1. ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИЙ**

Материальные и пространственные системы координат. Определение тензора. Нелинейный тензор деформаций, изменение длины и направления материального волокна, относительные удлинения и сдвиги. Определение векторов поворота и перемещения по заданным деформациям. Тождества Сен-Венана.

#### **Тема 2. ТЕОРИЯ НАПРЯЖЕНИЙ**

Формула Коши, условия парности касательных напряжений. Тензор напряжений. Преобразование напряжений при повороте системы координат. Главные направления и инварианты тензоров напряжений и деформаций. Диаграмма Мора. Максимальные значения касательных напряжений и сдвигов. Коэффициент Люде-Надаи. Уравнения равновесия элемента среды, выделенного из деформированного тела. Переход к линейным уравнениям равновесия.

#### **Тема 3. УРАВНЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ**

Упругость твёрдых тел, модуль Юнга, коэффициент Пуассона. Закон Гука для однородного изотопного тела, различные формы его записи. Модули сдвига и объемного сжатия, упругие постоянные Даме. Закон термоупругости Дюамеля-Неймана. Замкнутая система уравнений теории упругости. Различные формы ее записи, уравнения ламе, уравнения Бельтрами-Митчелла. Постановка основных краевых задач.

#### **Тема 4. ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ И ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ**

Теорема единственности решения основных краевых задач (статистика). Закон сохранения энергии. Упругий потенциал для изотермического и адиабатического процессов. Теорема единственности (динамика). Анизотропные упругие среды, обобщенный закон Гука. Формула и теорема взаимности Бетти. Принцип минимума полной энергии. Дополнительная работа, принцип Кастильяно. Принцип Гамильтона.

#### **Тема 5. ЗАДАЧА СЕН-ВЕНАНА**

Принцип Сен-Венана. Полуобратный метод Сен-Венана решения краевых задач. Постановка задачи Сен-Венана. Растворение стержня продольной силой, изгиб моментом. Общая теория кручения стержней. Функция Прандтля. Результирующее касательное напряжение и его свойства. Аналогия Прандтля.

#### **Тема 6. ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ**

Распространение волн в динамичной упругой среде. Продольные и поперечные волны, скорости их распространения. Поверхностные волны Рэлея.

#### **Тема 7. ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА. ОБЩИЕ ФОРМУЛЫ**

Плоская деформация, обобщенное плоское напряженное состояние. Основные уравнения плоской задачи, приведение к случаю отсутствия объемных сил. Функция напряжений. Комплексное представление бигармонической функции. Формулы Колесова-Мусхелишвили. Степень определенности введенных функций. Общие формулы для конечной многосвязной области. Некоторые свойства, вытекающие из аналитического характера решения плоской задачи; об аналитическом продолжении через контур. Приведение основных задач упругости к задачам теории функций комплексного переменного. О зависимости напряженного состояния от упругих постоянных.

#### **Тема 8. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ**

Ряды Фурье. Применение комфорного отображения. Преобразование основных формул, граничные условия в преобразованной области. Интегралы типа Коши, формулы для их вычисления. Приведение основных краевых задач плоской теории упругости к функциональным уравнениям.

#### **Тема 9. ТРЕХМЕРНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ**

Построение частных решений. Сосредоточенная сила в безграничной упругой среде. Применение теоремы Бетти в общей теории интегрирования уравнений теории упругости.

### **5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

## **5.1. Указания по организации и проведению лекционных, практических (семинарских) и лабораторных занятий с перечнем учебно-методического обеспечения.**

Основные формы занятий по дисциплине - лекции и практические занятия.

Лекция представляет собой систематичное, последовательное устное изложение преподавателем определенного раздела учебной дисциплины. Слушание лекции предполагает активную мыслительную деятельность аспиранта, главная задача которых - понять сущность рассматриваемой темы, уловить логику рассуждений лектора; размышляя вместе с ним, оценить его аргументацию, составить собственное мнение об изучаемых проблемах и соотнести услышанное с тем, что уже изучено. И при этом аспирант должен еще успевать делать записи изложенного в лекции материала.

Ведение конспектов является творческим процессом и требует определенных умений и навыков. Целесообразно следовать некоторым практическим советам: формулировать мысли кратко и своими словами, записывая только самое существенное; учиться на слух отделять главное от второстепенного; оставлять в тетради поля, которые можно использовать в дальнейшем для уточняющих записей, комментариев, дополнений; постараться выработать свою собственную систему сокращений часто встречающихся слов (это дает возможность меньше писать, больше слушать и думать).

Сразу после лекции полезно просмотреть записи и по свежим следам восстановить пропущенное, дописать недописанное. Важно уяснить, что лекция - это не весь материал по изучаемой теме, которыйдается аспирантам для его «зубрежки». Прежде всего, это – «путеводитель» аспирантам в их дальнейшей самостоятельной учебной и научной работе. Практическое занятие - это особая форма учебно-теоретических занятий, которая, как правило, служит дополнением к лекционному курсу. Его отличительной особенностью является активное участие самих аспирантов в объяснении вынесенных на рассмотрение проблем, вопросов. Преподаватель дает возможность аспирантам свободно высказаться по обсуждаемому вопросу и только помогает им правильно построить обсуждение.

Аспиранты заблаговременно знакомятся с планом семинарского занятия и литературой, рекомендуемой для изучения данной темы, чтобы иметь возможность подготовиться к семинару. При подготовке к занятию необходимо: проанализировать его тему, подумать о цели и основных проблемах, вынесенных на обсуждение; внимательно прочитать конспект лекции по этой теме; изучить рекомендованную литературу, делая при этом конспект прочитанного или выписки, которые понадобятся при обсуждении на семинаре; постараться сформулировать свое мнение по каждому вопросу и аргументированно его обосновать.

Практическое занятие помогает аспирантам глубоко овладеть предметом, способствует развитию умения самостоятельно работать с учебной литературой и документами, освоению аспирантами методов научной работы и приобретению навыков научной аргументации, научного мышления. Преподавателю же работа аспиранта на семинаре позволяет судить о том, насколько успешно они осваивают материал курса.

### ***Перечень учебно-методического обеспечения.***

1. Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. Добросвет. Издательство «КДУ». Москва, 2017.
2. Наука и жизнь: моя конвергенция. Избранные научные труды. М.В. Ковальчук. 2018 г. Москва, ИКЦ «Академкнига». Том 2. <https://www.phenix-online.org>
3. Теоретическая физика. В 10-и томах. Том 5. Статистическая физика. В 2-х частях. Часть 1. Учебное пособие. Гриф МО РФ. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц 2019 г. Издательство Физматлит, 293 с. <https://www.ntmdt-si.com/>

4. Теоретическая физика. Учебное пособие. В 10-и томах. Том [Х: Статистическая физика, Часть 2: Теория конденсированного состояния. Гриф МО РФ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц 2016 г. Издательство Физматлит, 44 с.

## 5.2. Указания для обучающихся по освоению дисциплины

Самостоятельная работа аспирантов является одним из основных видов учебной деятельности и предполагает изучение вопросов, не вошедших в основной план занятий.

Внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов в вузе не менее важна, чем обязательные учебные занятия. Ее успешность во многом определяется тем, насколько умело, рационально сам учащийся сможет организовать свои индивидуальные занятия, насколько регулярными и своевременными они будут.

Задания и методические указания для различных видов самостоятельной работы разрабатываются с учетом ее специфики, особенностей изучаемых тем, наличия учебной и методической литературы.

Систематическое освоение аспирантами необходимого учебного материала, своевременное выполнение предусмотренных учебных заданий, регулярное посещение лекционных и практических занятий позволяют подготовиться к успешному прохождению промежуточной аттестации по данной дисциплине.

В ходе самостоятельной работы аспиранты должны осуществлять:

- подготовку к занятиям, включая изучение лекций и литературы по теме занятия (используются лекции и источники, представленные в перечне основной и дополнительной литературы, а также электронные ресурсы);
- выполнение индивидуальных домашних заданий по теме прошедшего занятия;
- подготовку реферата (индивидуальные задания по слабо усвоенным темам), в том числе самостоятельное изучение части теоретического материала по темам, которые заявлены в теме реферата (используются источники, представленные в перечне основной и дополнительной литературы, а также электронные ресурсы).

К самостоятельной работе аспирантов также относятся: чтение основной и дополнительной литературы – самостоятельное изучение материала по рекомендуемым литературным источникам; работа с библиотечным каталогом, самостоятельный подбор необходимой литературы; работа со словарем, справочником; поиск необходимой информации в сети Интернет; конспектирование источников; реферирование источников; составление аннотаций к прочитанным литературным источникам; составление рецензий и отзывов на прочитанный материал; составление обзора публикаций по теме; составление и разработка терминологического словаря; составление библиографии (библиографической картотеки); подготовка к различным формам текущей и промежуточной аттестации (к тестированию, контрольной работе, зачету, экзамену); выполнение домашних контрольных работ; самостоятельное выполнение практических заданий репродуктивного типа (ответы на вопросы, задачи, тесты; выполнение творческих заданий).

**Таблица 4.**  
**Содержание самостоятельной работы обучающихся**

<b>Номер раздела (темы)</b>	<b>Темы/вопросы, выносимые на самостоятельное изучение</b>	<b>Кол-во часов</b>	<b>Формы работы</b>
1	Теория деформаций	8	Реферат
2	Теория напряжений	8	Эссе
3	Уравнения линейной теории упругости	8	Конспектирование
4	Общие теоремы и вариационные принципы	8	Контрольная работа

5	Задача Сан-Венана	8	Реферат
6	Динамические задачи	8	Эссе
7	Плоская задача. Общие формулы	8	Конспектирование
8	Методы решения плоской задачи	8	Контрольная работа
9	Трехмерные статические задачи	8	Реферат

### **5.3. Виды и формы письменных работ, предусмотренных при освоении дисциплины, выполняемые обучающимися самостоятельно**

**Реферат** – продукт самостоятельной работы аспиранта, представляющий собой краткое изложение в письменном виде полученных результатов теоретического анализа определенной научной (учебно-исследовательской) темы, где автор раскрывает суть исследуемой проблемы, приводит различные точки зрения, а также собственные взгляды на нее.

Порядок работы над рефератом.

1. Выбор темы.
2. Подбор и изучение литературы.
3. Составление плана реферата.
4. Изложение основного содержания по плану реферата.
5. Оформление и научно-справочный аппарат.

Общий объём работы – 15-30 страниц печатного текста (с учётом титульного листа, содержания и списка литературы) на бумаге формата А4. В тексте должны композиционно выделяться структурные части работы, отражающие суть исследования: введение, основная часть и заключение, а также заголовки и подзаголовки. Реферат должен быть выполнен на одной стороне листа белой бумаги формата А4. Интервал межстрочный – полуторный (1,5). Цвет шрифта – чёрный. Гарнитура шрифта основного текста – Times New Roman. Кегль (размер шрифта) – 14. Размеры полей страницы (не менее): правое – 30 мм, верхнее, нижнее и левое – 20 мм. Формат абзаца: полное выравнивание (по ширине). Отступ красной строки одинаковый по всему тексту, рекомендуется 1,25 см. Страницы должны быть пронумерованы с учётом титульного листа, который не обозначается цифрой. В работах могут использоваться цитаты, статистические материалы. Эти данные оформляются в виде сносок (ссылок и примечаний). Все сноски и подстрочные примечания располагаются на той же странице, к которой они относятся, нумерация сносок устанавливается заново на каждой странице. Размер шрифта для названия главы – 16 (полужирный), подзаголовка — 14 (полужирный). Точка в конце заголовка, располагаемого посередине листа, не ставится. Заголовки не подчёркиваются. Оглавление (содержание) должно быть помещено в начале работы, а список литературы в конце реферата.

**Эссе** – это средство, позволяющее оценить умение обучающегося письменно излагать суть поставленной проблемы, самостоятельно проводить анализ этой проблемы с использованием концепций и аналитического инструментария соответствующей дисциплины, делать выводы, обобщающие авторскую позицию по поставленной проблеме. При написании эссе аспирантам предстоит работать с высказываниями историков и современников о событиях и деятелях отечественной истории. Нужно выбрать одно, которое станет темой эссе. Задача – сформулировать собственное отношение к данному утверждению и обосновать его аргументами. При выборе темы эссе аспирант должен исходить из того, что:

- ясно понимаете смысл высказывания (не обязательно полностью или даже частично быть согласным с автором, но необходимо понимать, что именно он утверждает);
  - можете выразить свое отношение к высказыванию (аргументированно согласиться с автором либо полностью или частично опровергнуть его высказывание);
  - располагаете конкретными знаниями (факты, статистические данные, примеры) по данной теме;
  - владеете терминами, необходимыми для грамотного изложения своей точки зрения.
- При написании работы аспиранту следует руководствоваться следующими критериями:

- обоснованность выбора темы (объяснение выбора темы и задач, которые ставит перед собой в своей работе участник) – 1 балл;
- творческий характер восприятия темы, ее осмысливания – 1 балл;
- грамотность использования исторических фактов и терминов – 1 балл;
- четкость и доказательность основных положений работы – 1 балл;
- знание различных точек зрения по избранному вопросу – 1 балл.

**Конспектирование.** Конспект – это систематизированное, логичное изложение материала источника. Различаются четыре типа конспектов:

План-конспект – это развернутый детализированный план, в котором достаточно подробные записи приводятся по тем пунктам плана, которые нуждаются в пояснении.

Текстуальный конспект – это воспроизведение наиболее важных положений и фактов источника.

Свободный конспект – это четко и кратко сформулированные (изложенные) основные положения в результате глубокого осмысливания материала. В нем могут присутствовать выписки, цитаты, тезисы; часть материала может быть представлена планом.

Тематический конспект – составляется на основе изучения ряда источников и дает более или менее исчерпывающий ответ по какой-то схеме (вопросу). Данный тип конспектирования рекомендуется при подготовке к вопросам семинарского занятия.

**Контрольная работа** является одной из форм самостоятельного изучения аспирантами программного материала по всем предметам. Её выполнение способствует расширению и углублению знаний, приобретению опыта работы со специальной литературой.

Контрольные работы обычно включают практические задания, тесты, задачи и т.п. Для выполнения контрольной работы аспиранту предлагается один из вариантов заданий, также он получает указания или рекомендации к выполнению контрольной работы в устном (консультация) или печатном (методическое пособие) виде. Сдача контрольной работы происходит в установленные преподавателем сроки.

## **6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

### **6.1. Образовательные технологии**

Интерактивная лекция, проблемное изложение, технология «Дебаты».

### **6.2. Информационные технологии**

Информационные технологии, используемые при реализации различных видов учебной и внеучебной работы:

- использование Интернета в учебном процессе (использование информационного сайта преподавателя (рассылка заданий, предоставление выполненных работ на проверку, ответы на вопросы, ознакомление учащихся с оценками и т.д.);
- использование электронных учебников и различных сайтов (например, электронные библиотеки, журналы и т.д.) как источников информации;
- использование электронной почты преподавателя;
- использование средств представления учебной информации (электронных учебных пособий и практикумов, применение новых технологий для проведения очных (традиционных) лекций и семинаров с использованием презентаций и т.д.);
- использование интегрированных образовательных сред, где главной составляющей являются не только применяемые технологии, но и содержательная часть, т.е. информационные ресурсы (доступ к мировым информационным ресурсам, на базе которых строится учебный процесс).

### **6.3. Перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

*- Программное обеспечение*

Наименование программного обеспечения	Официальный сайт
LAMMPS	<a href="http://lammps.sandia.gov/">http://lammps.sandia.gov/</a>
QUANTUM ESPRESSO	<a href="https://www.quantum-espresso.org/">https://www.quantum-espresso.org/</a>
XDS	<a href="http://xds.mpimf-heidelberg.mpg.de">http://xds.mpimf-heidelberg.mpg.de</a>
Autodock Vina	<a href="http://vina.scripps.edu">http://vina.scripps.edu</a>
Pymol	<a href="https://pymol.org">https://pymol.org</a>
Nova PX	<a href="https://www.ntmdt-si.com/">https://www.ntmdt-si.com/</a>
АнНа (Анализатор Наночастиц)	<a href="https://crys.ras.ru/strukturainstituta/nauchnye-podrazdeleniywotdelektronnoj-kristallografiilaboratoriyaelektronografii">https://crys.ras.ru/strukturainstituta/nauchnye-podrazdeleniywotdelektronnoj-kristallografiilaboratoriyaelektronografii</a>

*- Современные профессиональные базы данных, информационные справочные системы*

<b>РИНЦ</b>	<a href="https://elibrgry.ru/orgs.asp">https://elibrgry.ru/orgs.asp</a>
<b>Web of Science</b>	<a href="http://apps.webofknowledge.com">http://apps.webofknowledge.com</a>
<b>Scopus</b>	<a href="https://www.scopus.com/home.uri">https://www.scopus.com/home.uri</a>
<b>Google Scholar citations</b>	<a href="https://scholar.google.ru">https://scholar.google.ru</a>
<b>IOP</b> Institute of Physics	<a href="https://www.io.or">https://www.io.or</a>
<b>AIP</b> Материалы компании American Institute of Physics	<a href="https://www.aip.org/">https://www.aip.org/</a>
<b>CASC</b> Материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных CASC	<a href="https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-andservices/research-databases">https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-andservices/research-databases</a>
<b>APS</b> Журналы Американского физического общества база данных APS Online Journals	<a href="https://www.aps.org/">https://www.aps.org/</a>
<b>IEEE</b> Материалы компании The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, а именно база данных IEEE/IEL	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp">http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp</a>
<b>RSC</b> материалы Royal Society of Chemistry	<a href="http://pubs.rsc.org/">http://pubs.rsc.org/</a>
<b>Wiley</b> Материалы компании John Wiley & Sons Ltd., а именно база данных Wiley Journals	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/">http://onlinelibrary.wiley.com/</a>
<b>Inspec</b> Материалы издательства EBSCO Publishing, а именно база данных INSPEC	<a href="https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-andservices/research-databases/inspec">https://www.ebsco.com/e/ru-ru/products-andservices/research-databases/inspec</a>

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

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 7.1. Паспорт фонда оценочных средств

При проведении текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине «Теория упругости» проверяется сформированность у обучающихся компетенций, указанных в разделе 3 настоящей программы. Этапность формирования данных компетенций в процессе освоения образовательной программы определяется последовательным освоением дисциплин и прохождением практик, а в процессе освоения дисциплины – последовательным достижением результатов освоения содержательно связанных между собой тем.

**Таблица 5.**  
**Соответствие разделов, тем дисциплины, результатов обучения по дисциплине и оценочных средств**

№ п/п	Контролируемые темы дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства

1	Теория деформаций.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Контрольная работа №1, эссе, реферат.
2	Теория напряжений.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест №1, эссе, реферат.
3	Уравнения линейной теории упругости.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Контрольная работа №2, эссе, реферат.
4	Общие теоремы и вариационные принципы.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест №2, эссе, реферат.
5	Задача Сан-Венана.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Контрольная работа №3 эссе, реферат.
6	Динамические задачи.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест №3, эссе, реферат.
7	Плоская задача. Общие формулы.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	«Круглый стол» по теме, эссе, реферат.
8	Методы решения плоской задачи.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Контрольная работа №4 эссе, реферат.
9	Трехмерные статические задачи.	УК-1, УК-3, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест №4, эссе, реферат.

## 7.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, описание шкал оценивания

**Таблица 6.**  
**Показатели оценивания результатов обучения в виде знаний**

Шкала оценивания	Критерии оценивания
5 «отлично»	демонстрирует глубокое знание теоретического материала, умение обоснованно излагать свои мысли по обсуждаемым вопросам, способность полно, правильно и аргументированно отвечать на вопросы, приводить примеры
4 «хорошо»	демонстрирует знание теоретического материала, его последовательное изложение, способность приводить примеры, допускает единичные ошибки, исправляемые после замечания преподавателя
3 «удовлетворительно»	демонстрирует неполное, фрагментарное знание теоретического материала, требующее наводящих вопросов преподавателя, допускает существенные ошибки в его изложении, затрудняется в приведении примеров и формулировке выводов
2 «неудовлетворительно»	демонстрирует существенные пробелы в знании теоретического материала, не способен его изложить и ответить на наводящие вопросы преподавателя, не может привести примеры

**Таблица 7.**  
**Показатели оценивания результатов обучения в виде умений и владений**

Шкала оценивания	Критерии оценивания

5 «отлично»	демонстрирует способность применять знание теоретического материала при выполнении заданий, последовательно и правильно выполняет задания, умеет обоснованно излагать свои мысли и делать необходимые выводы
4 «хорошо»	демонстрирует способность применять знание теоретического материала при выполнении заданий, последовательно и правильно выполняет задания, умеет обоснованно излагать свои мысли и делать необходимые выводы, допускает единичные ошибки, исправляемые после замечания преподавателя
3 «удовлетворительно»	демонстрирует отдельные, несистематизированные навыки, не способен применить знание теоретического материала при выполнении заданий, испытывает затруднения и допускает ошибки при выполнении заданий, выполняет задание при подсказке преподавателя, затрудняется в формулировке выводов
2 «неудовлетворительно»	не способен правильно выполнить задание

### **7.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Основные вопросы для проведения зачета по итогам освоения дисциплины:

1. Введение. Задача о растяжении стержня.
2. Нелинейный тензор деформаций.
3. Относительные удлинения и сдвиги.
4. Тензор напряжений.
5. Главные направления и инварианты тензора напряжений.
6. Диаграмма Мора.
7. Уравнения равновесия и движения.
8. Тождества Сен-Венана.
9. Закон Гука.
10. Закон термоупругости.
11. Замкнутая система уравнений статики.
12. Уравнения Ламе.
13. Уравнения Бельтрами-Митчела.
14. Теорема единственности. Статика.
15. Упругий потенциал.
16. Основные вариационные принципы теории упругости.
17. Плоская деформация и плоское напряжённое состояние.
18. Функция Эра.
19. Бигармоническое уравнение. Переход в комплексную плоскость.
20. Формула Гурса.
21. Формула Колосова-Мусхелишивили для перемещений.
22. Случаи односвязной, многосвязной и бесконечной областей.
23. Метод конформных отображений.
24. Метод рядов.
25. Применение интегралов типа Коши.
26. Теорема Леви-Митчелла, её применение.
27. Принцип Сен-Венана.
28. Задача Сен-Венана.
29. Продольные волны.
30. Поперечные волны.

31. Волны Релея.
32. Волны Лява.
33. В чем состоит метод Буссинеска построения частных решений упругих уравнений?
34. Решения в форме Папковича.
35. Задача о сосредоточенной силе в упругой среде? Вид особенности в точке приложения силы.
36. Применение теории Бетти в общей теории интегрирования упругих уравнений.

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

В ИФВД РАН действует балльно-рейтинговая система оценки учебных достижений аспирантов (БАРС). Успешность изучения каждого учебного курса в течение семестра оценивается, исходя из 100 максимальных возможных баллов. По дисциплине, итоговой формой отчетности для которой является экзамен, бальная оценка распределяется на две составляющие: семестровую (текущий контроль по учебной дисциплине в течение семестра) – 50 баллов, и экзаменационную – 50 баллов. В итоге суммарный рейтинговый балл освоения учебного курса за семестр на экзамене переводится в 4-балльную оценку, которая считается итоговой по учебному курсу в течение семестра и заносится в зачетную книжку аспиранта.

Шкала перевода рейтинговых баллов в итоговую оценку за семестр по учебному курсу

<b>Сумма баллов по дисциплине</b>	<b>Оценка по 4- балльной шкале</b>
90-100	5 (отлично), (зачтено)
85- 89	
75- 84	4 (хорошо), (зачтено)
70-74	
65-69	3 (удовлетворительно), (зачтено)
60-64	
Ниже 60 баллов	2 (неудовлетворительно), (не зачтено)

Преподаватель, реализующий дисциплину, в зависимости от уровня подготовленности обучающихся может использовать иные формы, методы контроля и оценочные средства, исходя из конкретной ситуации.

## **8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **a) Основная литература:**

1. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. «Физика твердого тела»: Учебник. Изд. 4-е. — М.: ЛЕНАНД, 2016. — 496 с.
2. Проблемы кристаллографии. Издательство Московского Университета. 2018 г.
3. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность локализации и коллективные моды. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 208 с.
4. Кристаллография. Лабораторный практикум. Под редакцией Е.В. Чупрунова. Москва. Физматлит, 2018.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. Добросвет. Издательство «КДУ». Москва, 2017.

4. Наука и жизнь: моя конвергенция. Избранные научные труды. М.В. Ковальчук. Москва, ИКЦ «Академкнига». Том 2. 2018 г.
5. Теоретическая физика. В 10-и томах. Том 5. Статистическая физика. В 2-х частях. Часть 1. Учебное пособие. Гриф МО РФ. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Издательство Физматлит, 2019. — 293 с.
6. Теоретическая физика. Учебное пособие. В 10-и томах. Том X: Статистическая физика, Часть 2: Теория конденсированного состояния. Гриф МО РФ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Издательство Физматлит, 2016 — 44 с.
7. Дифракционный структурный анализ. А.С. Илюшин, А.П. Орешко. 2017 г. М.: физический факультет МГУ, Издательский дом «Крепостновъ». 616 с.
8. Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах / И. Г. Кулев, И. И. Кулев, С. М. Бахарев, В. В. Устинов. - Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2018. - 254 с.
9. Физика конденсированного состояния, Учебное пособие. Байков Ю.А., Кузнецов В.М. Издательство Бином. Лаборатория знаний, 2019. — 293 с.
10. Хельтье Х.-Д. Молекулярное моделирование: теория и практика / Х.-Д. Хельтье, В. Зиппль, Д. Роньян, Г. Фолькерс. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. — 318 с.

#### **6) Дополнительная литература:**

1. Безуглов Н. Н. Проявления "динамического хаоса" в реакциях с участием ридберговских состояний. Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, сор, 2017. - 111 с.
2. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы Структура и свойства Издательство ЛиброКом, 2016. - 484 с.
3. Вайнштейн Б. К. Кристаллография и жизнь. Москва: Физматлит. 2017 г.
4. Стишов С. М. Фазовые переходы для начинающих. Институт физики высоких давлений РАН. - Изд. 2-е. - Троицк: Тровант, 2017. - 105, [1] с
5. Кристаллография. Основные представления о кристаллах, кристаллических веществах и методах их изучения. Задачи по геометрической кристаллографии и анализ их решений. Завьялов Е.Н. Издательство Книжный дом «Университет» (КДУ), 2016. - 314 с.
6. Маневич Леонид Исакович. Аналитически разрешимые модели механики твердого тела / Маневич Л.И., Гендельман О.В. — М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2016. — 343 с.
7. Ремпель А. А. Нестехиометрия в твердом теле. - Москва: Физматлит, 2018. - 636 с.
8. Структурные исследования кристаллов. Наука Физматлит. 2016 г.
9. Третьякова Татьяна Викторовна. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов / Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. — М.: Физматлит, 2016. — 118 с.
10. Фейнман Ричард Ф., Лейтон Роберт Б., Сэндс Мэтью Фейнмановские лекции по физике: Вып. 1, 2: Современная наука о природе. Законы механики. Пространство. Время. Движение: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. изд. 11-е. - М.: УРСС: книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 448 с.
11. Фейнман Ричард Ф., Лейтон Роберт Б., Сэндс Мэтью Фейнмановские лекции по физике: Вып.3: Излучение. Волны. Кванты: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. Я.А. Смородинского. Изд. 10-е. — М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. — 256 с.

12. Фейнман Ричард Ф., Лейтон Роберт Б., Сэндс Мэтью Фейнмановские лекции по физике: Задачи и упражнения с ответами и решениями к вып. 14: Учебное пособие. Пер. с англ./Под ред. и с предисл. А.П. Леванюка. Изд. 9-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. – 280 с.; Задачи и упражнения с ответами и решениями к вып. 5-9: Учебное пособие. Пер. с англ. Под ред. А.П. Леванюка. Изд. 9-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2020. – 272 с.

**в) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимый для освоения дисциплины**

LAMMPS	<a href="http://lammps.sandia.gov/">http://lammps.sandia.gov/</a>
QUANTUM ESPRESSO	<a href="https://www.quantum-espresso.org/">https://www.quantum-espresso.org/</a>
XDS	<a href="http://xds.mpimf-heidelberg.mpg.de">http://xds.mpimf-heidelberg.mpg.de</a>
Autodock Vina	<a href="http://vina.scripps.edu">http://vina.scripps.edu</a>
Pymol	<a href="https://pymol.org">https://pymol.org</a>
Nova PX	<a href="https://www.ntmdt-si.com/">https://www.ntmdt-si.com/</a>
АнНа (Анализатор Наночастиц)	<a href="https://crys.ras.ru/strukturainstituta/nauchnye-podrazdeleniywotdelelektronnoj-kristallografii/laboratoriyaelektronografii">https://crys.ras.ru/strukturainstituta/nauchnye-podrazdeleniywotdelelektronnoj-kristallografii/laboratoriyaelektronografii</a>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий:

При выполнении лабораторных работ используются компьютеры с характеристиками не ниже Pentium 4 - 3Гц/512Мб/80ГБ с 17-дюймовыми мониторами, объединенные в локальную сеть, подключенную через сеть ИФВД РАН к Интернету. Для получения необходимой информации используются Web-ресурсы сети Интернет и локальная библиотека электронных материалов.

Залы, оснащенные компьютером с проектором, обычной доской - для проведения семинаров, лекционных и практических занятий.

**Перечень оборудования:**

1. Гидравлические прессы усилием 5000 и 10000 тонн с камерами «Тороид-10», «Тороид-15», «Тороид-35» для синтеза при высоких температурах и давлениях
2. Установка для высокотемпературной газовой экструзии при высоком газовом давлении до 0.5 Гпа
3. Установка для измерения микро-рамановских и микро-фотолюминесцентных спектров со сверхвысоким разрешением
4. Специализированный спектрометр VUKAP
5. Спектрометр высокоточный с эффективными четырьмя сцинтилляционными детекторами с кристаллом LaBr<sub>3</sub>(Ce) с фотоэлектронными умножителями Hamamatsu R13089
6. Измерительная система физических свойств (PPMS), которая позволяет проводить измерения электросопротивления и теплоемкости веществ в области температур от 2 до 400 К
7. Инфракрасный спектрометр «BRUKER»
8. Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой для микроанализа INCA 250 (Oxford Instruments)

9. Рентгеновские дифрактометры DRON-2.0
10. Рентгеновская Гинье камера (Imaging Plate Guinier Camera G670, Huber, Germany)
11. Рентгеновский дифрактометр на базе Imaging Plate MAR345
12. 96-ядерный вычислительный кластер "Азбука"
13. Муфельная печь для спекания деталей ячеек высокого давления при температурах до 1800 °C
14. Шаровая мельница
15. Аналитические весы GR-200
16. Аналитические весы AL 304-IC
17. Функциональный генератор Tektronix AFG 3251
18. Осциллограф Agilent Technologies