

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

**УТВЕРЖДЕНО**

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

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Термодинамика конденсированного состояния
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: И.В. Ломоносов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высокотемпературных процессов 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Термодинамика конденсированного состояния" предусматривает изучение экспериментальных и теоретических методов исследований термодинамических свойств конденсированного вещества при высоких давлениях и температурах, полуэмпирических методов расчета и применению полученных знаний на практике.

Задачи курса:

- изучение экспериментальных методов исследования при высоких давлениях и температурах,
- ознакомление с первопринципными методами расчета термодинамических свойств конденсированного вещества;
- изучение математических и физических требований к уравнениям состояния для практических расчетов, изучение принципов построения полуэмпирических уравнений состояния;
- формирование у магистрантов способности оперировать полученными знаниями для оценок термодинамических свойств вещества, ставить задачи и уметь планировать исследования при высоких давлениях и температурах.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ основы физики твердого тела, жидкого состояния, плазмы, ударных волн в конденсированных средах;
- ☐ экспериментальные методы исследований термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ теоретические методы расчета термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ практические требования к уравнениям состояния и принципы построения полуэмпирических моделей уравнений состояния.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Метод ударного сжатия
2. Методы расчета твердой фазы
3. Модели жидкого состояния
4. Модели плазмы
5. Основные понятия физики высоких давлений
6. Реальные уравнения состояния в практике
7. Сопоставление теоретических методов
8. Сопоставление экспериментальных методов.
9. Статические методы исследований.
10. Табличные уравнения состояния
11. Теоретические методы расчета свойств твердого тела
12. Учет эффектов ангармонизма тепловых колебаний атом и электронов проводимости
13. Электрический взрыв проводников.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение экспериментальных и теоретических методов исследований термодинамических свойств конденсированного вещества при высоких давлениях и температурах, полуэмпирических методов расчета и применению полученных знаний на практике.

### Задачи дисциплины

- изучение экспериментальных методов исследования при высоких давлениях и температурах,
- ознакомление с первопринципными методами расчета термодинамических свойств конденсированного вещества;
- изучение математических и физических требований к уравнениям состояния для практических расчетов, изучение принципов построения полуэмпирических уравнений состояния;
- формирование у магистрантов способности оперировать полученными знаниями для оценок термодинамических свойств вещества, ставить задачи и уметь планировать исследования при высоких давлениях и температурах.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

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

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ основы физики твердого тела, жидкого состояния, плазмы, ударных волн в конденсированных средах;
- ☐ экспериментальные методы исследований термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ теоретические методы расчета термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ практические требования к уравнениям состояния и принципы построения полуэмпирических моделей уравнений состояния.

уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- ☐ работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и экспериментальных результатов.

владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории;
- ☐ культурой постановки и моделирования физических задач;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов экспериментов и сопоставления с теоретическими и литературными данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками выполнения оценок термодинамических свойств вещества при высоких давлениях и температурах для анализа процессов в экстремальных условиях.

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

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

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Метод ударного сжатия		4		
2	Методы расчета твердой фазы		4		25
3	Модели жидкого состояния		3		
4	Модели плазмы		2		25
5	Основные понятия физики высоких давлений		1		
6	Реальные уравнения состояния в практике		2		
7	Сопоставление теоретических методов		1		5
8	Сопоставление экспериментальных методов.		1		15
9	Статические методы исследований.		4		
10	Уравнения состояния		1		
11	Теоретические методы расчета свойств твердого тела		3		5
12	Учет эффектов ангармонизма тепловых колебаний атом и электронов проводимости		2		
13	Электрический взрыв проводников		2		
Итого часов			30		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Метод ударного сжатия

Законы Гюгонио. Методы торможения и отражения. Генераторы ударных волн. Сверхвысокие давления, проблема эталона. Измерения фазовых переходов. Ударное сжатие пористого вещества. Метод изэнтропического расширения. Восстановление термодинамического потенциала по данным ударноволновых измерений.

## 2. Методы расчета твердой фазы

Модели Эйнштейна и Дебая твердого тела. УРС Ми-Грюнайзена, связь коэффициента Грюнайзена с параметрами кривой упругого сжатия.

Потенциалы Борна-Майера, Берча-Мурнагана, Морзе; проблема описания сильносжатых состояний при  $T=0$  К.

## 3. Модели жидкого состояния

Понятия парной корреляционной функции и структурного фактора. Интегральные уравнения Борна-Грина-Ивона, Перкуса-Иевики, гиперцепное приближение, решение уравнения Перкуса-Иевики для потенциала твердых и мягких сфер.

## 4. Модели плазмы

Метод Томаса-Ферми.

## 5. Основные понятия физики высоких давлений

Введение. Научный метод познания – от эксперимента к теории и практическим применениям. Построение курса: экспериментальные методы, строгие теории, их объединение в модельных уравнениях состояния. Мотивация изучения уравнения состояния вещества. Системные и несистемные единицы измерений.

## 6. Реальные уравнения состояния в практике

Примеры реальных уравнений состояния, принципов построения и использования в расчетах. Важность корректного учета фазовых границ. Перспективы эксперимента и теории.

## 7. Сопоставление теоретических методов

Методические особенности, область применимости. Выводы.

## 8. Сопоставление экспериментальных методов.

Особенности методов, погрешности, область применимости. Выводы.

## 9. Статические методы исследований.

Общий анализ фазовой диаграммы. Наковальни Бриджмена, устройства изучения Р-Т диаграмм, алмазные наковальни. Лазерные алмазные наковальни.

## 10. Уравнения состояния

Табличные уравнения состояния конденсированного состояния вещества.

## 11. Теоретические методы расчета свойств твердого тела

Типы кристаллических решеток, о.ц.к. и г.ц.к. решетки, понятие решетки Бравэ, ячейки Вигнера-Зейтца.

Общие свойства для периодических решеток, граничные условия, число состояний, зонный спектр. Приближение сильной связи. Приближение слабой связи. Метод ячеек, МТ – потенциал. Метод присоединенных плоских волн. Метод гриновских функций RRH (Корринга-Кон-Ростокер). Метод ортогонализированных плоских волн. Метод функционала плотности.

## 12. Учет эффектов ангармонизма тепловых колебаний атом и электронов проводимости

Плавление, учет плавления в моделях уравнения состояния, критерии плавления, учет эффектов ангармонизма тепловых колебаний атомов решетки по Кормеру, способы описания жидкой фазы.

Термодинамика электронной компоненты в различных областях фазовой диаграммы.

## 13. Электрический взрыв проводников

Изобарическое расширение. Взрыв в конечный объем. Плазменный изохорический генератор.

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

Необходимое оборудование для практических занятий: учебная аудитория, компьютеры и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит. Изд. 3., 656 с., 2008.
2. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Статистическая физика. Часть 1: Учебное пособие для вузов. — М.: Физматлит, 2010. — 616 с.
3. Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества. М. : Физматлит, 304 с., 2009.
4. Жерноклетов М.В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Саратов, 403 с., 2003.

### Дополнительная литература

1. Физика высоких плотностей энергии / Ред. П.Кальдиrola, Г.Кнопфель. - М.: Мир, 1974.
2. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. -1965. - Т.85. - С.197-258.
3. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. - М.: Наука, 1968.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела, т.1,2. - М.: Мир, 1979.
5. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. - М.: Наука, 1986.
6. Физика простых жидкостей / Ред. Темперли - М.: Мир, 1971.

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

База данных по свойствам веществ в условиях ударного сжатия и изэнтропического расширения, <http://www.ficp.ac.ru/rusbank>

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

не предусмотрены.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

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

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

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

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

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	И.В. Ломоносов, д-р физ.-мат. наук, профессор



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

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

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Термодинамика конденсированного состояния» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ основы физики твердого тела, жидкого состояния, плазмы, ударных волн в конденсированных средах;
- ☐ экспериментальные методы исследований термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ теоретические методы расчета термодинамических свойств веществ при высоких давлениях и температурах;
- ☐ практические требования к уравнениям состояния и принципы построения полуэмпирических моделей уравнений состояния.

### уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- ☐ работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и экспериментальных результатов.

### владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории;
- ☐ культурой постановки и моделирования физических задач;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов экспериментов и сопоставления с теоретическими и литературными данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками выполнения оценок термодинамических свойств вещества при высоких давлениях и температурах для анализа процессов в экстремальных условиях.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия.

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

Вопросы к экзамену:

1. Понятие уравнения состояния (УРС). Примеры функциональных УРС, табличных и графических.
2. Системные и несистемные физические единицы в физике высоких давлений.
3. Наковальни Бриджмена: область давлений, особенности диагностики, типичные погрешности.
4. Устройства измерения фазовых диаграмм давление – плотность: область давлений и температур, особенности диагностики, типичные погрешности.
5. Алмазные наковальни, алмазные наковальни с лазерным подогревом. Особенности диагностики, типичные погрешности. Важность обеспечения стационарности.
6. Аппроксимационные потенциалы давления для результатов статического сжатия.
7. Электровзрыв проводников: изобарическое расширение, расширение в конечный объем. Реализуемая область давлений и температур, особенности диагностики, типичные погрешности.
8. Метод ударного сжатия. Уравнения Гюгонио. Особенности метода. Область применимости уравнений Гюгонио для измерений термодинамических свойств вещества.
9. Методы торможения и отражения.
10. Генераторы ударных волн.
11. Лазерные ударные волны.
12. Сверхвысокие давления, проблема эталона.
13. Измерения фазовых переходов при ударном сжатии.
14. Ударное сжатие пористого вещества.
15. Предельная степень сжатия в методе ударного сжатия, предельная степень сжатия идеального газа.
16. Метод изэнтропического расширения.
17. Восстановление термодинамического потенциала на основании данных ударноволновых измерений – метод Зельдовича.
18. Сравнение методов изотермического, изэнтропического и ударного сжатия.
19. Анализ возможностей современных экспериментальных методов, особенности, ограничения физические и материаловедческие.
20. Понятие кристаллической решетки. Типы кристаллических решеток. Решетка Бравэ.
21. Общие свойства для периодических решеток, граничные условия, число состояний, зонный спектр
22. Приближение сильной связи
23. Приближение слабой связи
24. Метод присоединенных плоских волн
25. Метод ортогонализированных плоских волн
26. Метод функционала плотности
27. Автомодельная теория Томаса – Ферми при  $T=0$  К
28. Автомодельная теория Томаса – Ферми при конечных температурах
29. Теория жидкости: функция распределения, корреляционная функция, структурный фактор.
30. Решение уравнения Перкуса-Йевики для потенциала твердых сфер
31. Анализ возможностей теоретических методов расчета.
32. Квазигармоническая модель твердого тела: модели Дебая и Эйнштейна
33. Вывод УРС Ми – Грюнайзена
34. Коэффициент Грюнайзена: определения дифференциального, термодинамического и дифференциального термодинамического, их отличия
35. Связь коэффициента Грюнайзена с параметрами кривой упругого сжатия, уравнения Слетера, Дугдейла-Макдональда и Ващенко-Зубарева

36. Потенциалы Борна-Майера, Берча-Мурнагана, Морзе
37. Проблема описания сильносжатых состояний при  $T=0$  К
38. Плавление, учет плавления в моделях уравнения состояния, критерии плавления,
39. Учет эффектов ангармонизма тепловых колебаний атомов решетки по Кормеру, способы описания жидкой фазы
40. Термодинамика электронной компоненты в различных областях фазовой диаграммы
41. Аппроксимационные УРС
42. Глобальные УРС, методы построения табличных УРС, проблема термодинамической согласованности.
43. Математические и физические требования к УРС для практических расчетов.
44. Влияние УРС на результаты численного моделирования, необходимость учета плавления и испарения

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Анализ возможностей теоретических методов расчета.
2. Математические и физические требования к УРС для практических расчетов.

Пример 2.

1. Электровзрыв проводников: изобарическое расширение, расширение в конечный объем. Реализуемая область давлений и температур, особенности диагностики, типичные погрешности.
2. Метод изэнтропического расширения.

#### Критерии оценивания

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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