

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

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Модели уравнений состояния
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики высоких плотностей энергии
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: К.В. Хищенко, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высоких плотностей энергии 04.06.2020

Аннотация

Этот курс лекций посвящен проблеме описания термодинамических свойств различных материалов во всем многообразии состояний, получаемых при варьировании внешних условий (давлений, температур) в широких пределах. Знание термодинамических свойств материалов требуется при решении многих задач физики высоких плотностей энергии путем численного моделирования процессов, в которых такие плотности энергии достигаются. Например, при взаимодействии интенсивного лазерного излучения или пучков высокоэнергетических частиц с веществом, при высокоскоростном соударении тел, при электрическом взрыве проводников. Решение подобных задач основывается на системе уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии. Для того чтобы эта система стала замкнутой, необходимо еще одно уравнение, которое соотносит давление, внутреннюю энергию и плотность вещества друг с другом, т.е. уравнение состояния.

На лекциях рассматриваются модели, которые привлекаются для описания состояний твердотельной, жидкой и газовой фаз вещества. Внимание уделяется общему анализу фазовой диаграммы, описанию метастабильных состояний и границ устойчивости термодинамического равновесия. Обсуждаются способы экспериментальной проверки теоретических моделей уравнений состояния в широком диапазоне давлений и температур. Излагаются основы методов изучения термодинамических свойств в экспериментах при высоких давлениях, достигаемых как в статических, так и в динамических условиях. А также при высоких температурах, получаемых как при стационарном, так и при импульсном нагреве. Дается обзор широкодиапазонных моделей уравнений состояния материалов для решения практических задач физики высоких плотностей энергии.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по моделям уравнений состояния вещества для дальнейшего использования в других областях физического знания, дисциплинах естественнонаучного содержания и научно-исследовательской работе; формирование научного подхода к решению физических задач, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний по моделям уравнений состояния вещества;
- формирование общего научного подхода к изучению физических процессов;
- формирование умений и навыков применять полученные знания для решения физических задач, самостоятельного анализа полученных результатов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)

ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- модели уравнений состояния.

уметь:

- объяснять принципы построения уравнений состояния;
- определять область применимости различных уравнений состояния и возможные способы их экспериментальной проверки.

владеть:

- различными методами построения и проверки уравнений состояния.

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	Введение в проблему моделей уравнений состояния.	4			4
2	Экспериментальные методы изучения термодинамических свойств и фазовых превращений веществ.	4			4
3	Фазовые переходы и метастабильные состояния.	4			4
4	Идеальный газ Бозе–Эйнштейна.	4			4
5	Идеальный газ Ферми–Дирака.	4			4
6	Идеальный газ Больцмана–Максвелла. Неидеальные газы.	4			4
7	Полуэмпирические уравнения состояния.	6			6
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение в проблему моделей уравнений состояния.

Предмет курса. Актуальность исследования термодинамических свойств и фазовых превращений вещества в широком диапазоне температур и давлений. Основные понятия термодинамики и статистической физики. Термодинамические потенциалы.

2. Экспериментальные методы изучения термодинамических свойств и фазовых превращений веществ.

Статические эксперименты при высоких давлениях. Электрический взрыв проводников под действием мощных импульсов тока. Ударное сжатие сплошных и пористых образцов. Изоэнтальпическое расширение ударно-сжатых веществ.

3. Фазовые переходы и метастабильные состояния.

Фазовые состояния вещества. Фазовое равновесие. Сосуществование двух и трех фаз в равновесии. Критическая точка фазового перехода. Метастабильные состояния и границы устойчивости фазы. Общий вид фазовой диаграммы. Характерные примеры фазовых диаграмм.

4. Идеальный газ Бозе–Эйнштейна.

Уравнение состояния. Фононный газ в кристаллической решетке. Модели Дебая и Эйнштейна. Уравнение Ми–Грюнайзена.

5. Идеальный газ Ферми–Дирака.

Уравнение состояния. Электроны в металле. Электроны в диэлектрике.

6. Идеальный газ Больцмана–Максвелла. Неидеальные газы.

Уравнение состояния одноатомного газа. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Связь параметров уравнения состояния газа Ван-дер-Ваальса с параметрами критической точки.

7. Полуэмпирические уравнения состояния.

Холодная кривая и ударная адиабата конденсированного вещества. Связь коэффициента Грюнайзена с параметрами холодной кривой. Интерполяционные выражения для описания теплового вклада атомов и электронов в уравнение состояния в широком диапазоне температур.

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

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

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010. — 616 с.
2. Валько В. В., Ломоносов И. В., Острик А. В., Фортон В. Е., Хищенко К. В. Широкодиапазонные уравнения состояния конструкционных материалов // Физика ядерного взрыва. В 5 т. Том 2. Действие взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. С. 140–228.

Дополнительная литература

1. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст]/Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, -М., Физматлит, 2008
2. Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы [Текст], [монография]/В. Е. Фортов, -М., Физматлит, 2012
3. Бушман А. В., Фортов В. Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. 1983. Т. 140. № 2. С. 177-232.

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

1. <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/> – экспертная система по уравнениям состояния в экстремальных условиях.
2. <http://lib.mipt.ru> – электронная библиотека Физтеха.
3. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
4. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
5. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Для контроля и коррекции знаний обучающиеся могут использовать компьютерное тестирование, в том числе на портале www.i-exam.ru. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Mathcad, Scilab и др.

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

Студент, изучающий курс «Модели уравнений состояния», должен, с одной стороны, овладеть различными теоретическими методами описания термодинамических свойств веществ в широком диапазоне параметров на фазовой диаграмме, а с другой стороны, должен понимать, как эти методы применяются в практике решения задач, связанных с анализом и численным моделированием процессов с интенсивным импульсным воздействием на вещество.

Уравнение состояния является фундаментальной характеристикой вещества, определяющей его свойства в широком диапазоне температур и давлений. Проблема термодинамического описания высокоэнергетических состояний среды занимает одно из центральных мест в современной физике высоких плотностей энергии.

Развитие мощных источников импульсного воздействия (лазерное, рентгеновское или пучковое воздействие, высокоскоростной удар и т. п.) сделало объектом лабораторных исследований состояния вещества в обширной области фазовой диаграммы, характеризующейся экстремально высокими значениями давлений и температур. При этом возникает чрезвычайное разнообразие физических состояний — от сжатых и сильно разогретых состояний конденсированной фазы до разреженных состояний газа или плазмы. Проведение гидродинамического моделирования подобных процессов требует знания термодинамических свойств вещества в широкой области фазовой плоскости. Уравнение состояния, замыкающее систему уравнений движения среды, в существенной степени определяет точность и надежность результатов вычислений. Следует также отметить, что получаемая в условиях интенсивного энерговыделения опытная информация имеет, как правило, сложный интегральный характер и интерпретация результатов экспериментальных измерений в большинстве случаев невозможна без привлечения методов численного моделирования.

Основная трудность последовательного теоретического расчета уравнений состояния в условиях, характерных для импульсных высокоэнергетических процессов, заключается в необходимости корректного учета сложного по структуре межчастичного взаимодействия. Современные теоретические модели, использующие выделение одного или нескольких малых параметров, позволяют проводить вычисление термодинамических характеристик вещества лишь на отдельных и не перекрывающихся участках фазовой плоскости, причем для химических соединений такая возможность резко сужается.

Альтернативный подход при построении уравнений состояния в широком диапазоне параметров заключается в создании полуэмпирических моделей. В таких моделях общий вид функциональных зависимостей термодинамического потенциала устанавливается с привлечением теоретических представлений, а данные экспериментальных измерений используются для определения численных значений свободных коэффициентов в этих зависимостях. Подобный метод дает возможность, максимально используя имеющуюся опытную информацию, получить уравнение состояния в компактной форме, удобной для проведения численных расчетов.

Немаловажно, что экспериментальная информация о поведении вещества в широкой области фазовой диаграммы не только позволяет проверить адекватность теоретических моделей, но и является фактической основой существования полуэмпирических методов термодинамического описания.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях.

Руководство и контроль над самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики высоких плотностей энергии
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	К.В. Хищенко, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Модели уравнений состояния» обучающийся должен:

знать:

- модели уравнений состояния.

уметь:

- объяснять принципы построения уравнений состояния;
- определять область применимости различных уравнений состояния и возможные способы их экспериментальной проверки.

владеть:

- различными методами построения и проверки уравнений состояния.

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

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

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

Экзамен проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 9-ом семестре:

1. Актуальность исследования термодинамических свойств и фазовых превращений вещества в широком диапазоне температур и давлений.

2. Основные понятия термодинамики и статистической физики.
3. Термодинамические потенциалы.
4. Статические эксперименты при высоких давлениях.
5. Электрический взрыв проводников под действием мощных импульсов тока.
6. Ударное сжатие сплошных и пористых образцов.
7. Изозэнтропическое расширение ударно-сжатых веществ.
8. Фазовые состояния вещества. Фазовое равновесие.
9. Сосуществование двух и трех фаз в равновесии.
10. Критическая точка фазового перехода.
11. Метастабильные состояния и границы устойчивости фазы.
12. Общий вид фазовой диаграммы.
13. Характерные примеры фазовых диаграмм.
14. Уравнение состояния идеального газа Бозе–Эйнштейна.
15. Фононный газ в кристаллической решетке.
16. Модели Дебая и Эйнштейна. Уравнение Ми–Грюнайзена.
17. Уравнение состояния идеального газа Ферми–Дирака.
18. Свойства электронной подсистемы в металле.
19. Свойства электронной подсистемы в диэлектрике.
20. Уравнение состояния идеального одноатомного газа Больцмана–Максвелла.
21. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса.
22. Связь параметров уравнения состояния газа Ван-дер-Ваальса с параметрами критической точки.
23. Холодная кривая и ударная адиабата конденсированного вещества.
24. Связь коэффициента Грюнайзена с параметрами холодной кривой.
25. Интерполяционные выражения для описания теплового вклада атомов в уравнение состояния в широком диапазоне температур.
26. Интерполяционные выражения для описания теплового вклада электронов в уравнение состояния в широком диапазоне температур.

Пример экзаменационного билета (используемого для проведения экзамена):

1. Основные понятия термодинамики и статистической физики.
2. Изозэнтропическое расширение ударно-сжатых веществ.
3. Свойства электронной подсистемы в диэлектрике.
4. Задача. Определить максимально возможное давление в процессе удара алюминиевой пластины по алюминиевой пластине со скоростью 2 км/с.

Критерии оценивания

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он показал 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 (9)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые были самостоятельно обнаружены и исправлены;

оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые после указания экзаменатора были самостоятельно исправлены;

оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает неточности в ответе или делает несущественные ошибки при решении задач;

оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает небольшие ошибки в ответе и (или) при решении задач;

оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но отвечает неуверенно и (или) допускает ошибки при решении задач;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, если при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, не владеющему некоторыми разделами учебной программы, но умеющему применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;

оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, показавшему полное незнание учебной программы дисциплины.

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 мин на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не превышает двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также конспектом лекций, справочной литературой и вычислительной техникой.