

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета



С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

**Кинетика фазовых превращений**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2021**

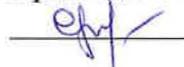
Код дисциплины в учебном плане Б1.В.ДВ.01.07.17

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

ИПК 1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить аппарат кинетики фазовых превращений и физические представления о фазовых переходах первого и второго рода.

– Научиться применять представления кинетики фазовых превращений при решении практических и теоретических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Физика металлов".

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 8, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть основными представлениями и понятиями из курсов: Математический анализ; Дифференциальные уравнения; Общий курс физики.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 з.е., 72 часа, из которых:

– лекции: 24 ч.;

– практические занятия: 24 ч.;

в том числе практическая подготовка: 24 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Кинетика фазовых переходов второго рода.

Феноменологическая теория фазовых переходов по Ландау. Разделение переходов на первый и второй род. Понятие о параметре порядка в теории фазовых переходов. Скачок теплоемкости. Влияние внешнего поля на фазовый переход. Восприимчивость. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода. Примеры с возникновением упорядоченных сверхструктур. Флуктуации параметра порядка. Корреляционный радиус. Условия применимости теории Ландау. Критическая область. Критические индексы.

Тема 2. Кинетика фазовых переходов первого рода.

Зарождение и рост новой фазы в однокомпонентной системе. Изменение термодинамического потенциала при образовании зародыша новой фазы. Критический зародыш. Высота термодинамического барьера зарождения. Частота зарождения. Температурная зависимость. Ансамбль частиц новой фазы и гетерофазных флуктуаций. Термодинамический потенциал системы, содержащей ансамбль частиц новой фазы. Энтропия распределения частиц новой фазы. Равновесная функция распределения. Временная эволюция ансамбля частиц новой фазы. Диффузия в  $n$ -пространстве. Уравнение Зельдовича. Стационарная частота зарождения. Кинетика превращения в целом. Кинетический закон  $\gamma(t)$ . Кинетические кривые. Диаграммы “температура-время-превращение”. Кинетический закон Ерофеева-Аврами. Гетерогенное зарождение новой фазы. Зарождение новой фазы при распаде пересыщенного раствора. Локальное равновесие на межфазной границе при распаде пересыщенных растворов. “Коллоидное равновесие” и возврат фазы выделения. Ознакомление с программным пакетом MatCalc, позволяющем проводить термодинамические и кинетические расчеты. Расчет кинетики выделения вторичных фаз, получение кинетических кривых в программном пакете MatCalc.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей активность студента на семинарских занятиях, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): максимальное количество баллов - 50. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Примерный перечень вопросов к зачету:

1. Зарождение частицы новой фазы. Изменение термодинамического потенциала. Объемный и поверхностный вклад.
2. Фаза. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
3. Критический зародыш. Высота термодинамического барьера зарождения. Частота зарождения, температурная зависимость.
4. Критические индексы. Температурные зависимости теплоемкости, параметра порядка, корреляционного радиуса, корреляционной функции, восприимчивости для слабых и сильных полей.
5. Ансамбль частиц новой фазы и гетерофазных флуктуаций.
6. Разложение потенциала в ряд по степеням  $\eta$ , зависимость степени дальнего порядка от температуры вблизи точки перехода. Скачок теплоемкости.
7. Временная эволюция ансамбля частиц новой фазы.
8. Фазовые переходы второго рода. Формула Эренфеста.
9. Кинетика превращения в целом. Кинетические кривые. Диаграммы “температура-время-превращение”.
10. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода. Ограничения.
11. Локальное равновесие на межфазной границе при распаде пересыщенных растворов.

12. Кинетический закон Ерофеева-Аврами.
13. Гетерогенное зарождение новой фазы. Зарождение при конденсации жидкой фазы на твердой подложке.
14. Влияние внешнего поля на фазовый переход. Восприимчивость. Слабые и сильные поля.
15. Общие сведения о феноменологической теории фазовых переходов по Ландау. Понятие о параметре порядка.
16. Стационарная частота зарождения новой фазы.
17. Термодинамические ситуации распада пересыщенных растворов. Простой распад.
18. Уравнение Зельдовича.
19. Зарождение новой фазы при распаде пересыщенного раствора. Изменение термодинамического потенциала при зарождении частицы фазы выделения.
20. “Предвыделения”, метастабильные фазы выделения и сегрегации на кристаллических дефектах.
21. Термодинамика сверхпроводников. Фазовые переходы первого и второго рода применительно к сверхпроводникам. Теплоемкость. Сжимаемость.
22. Зарождение новой фазы при распаде пересыщенного раствора. Термодинамический стимул зарождения фазы постоянного состава в идеальном растворе.
23. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода. Разложение потенциала  $\Phi$ .
24. “Коллоидное равновесие “ и возврат фазы выделения.
25. Флуктуации параметра порядка. Корреляционная функция.
26. Диаграмма Конобеевского.

На промежуточную аттестацию планируется не более 50 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам текущего контроля за семестр и промежуточной аттестации.

Результаты зачета определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка определяется исходя из результатов экзамена и текущей аттестации в течение семестра и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих сформированность компетенций ОПК-2 и ПК-1 в соответствии с индикаторами ИОПК 2.2. и ИПК 1.1. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

### **БИЛЕТ № 1**

Вопрос 1. Зарождение частицы новой фазы. Изменение термодинамического потенциала. Объемный и поверхностный вклад.

Вопрос 2. Фаза. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и всему содержанию курса (разделы 8, 11), позволяющие оценить уровень освоения всей программы. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений.

Например:

Вопрос 1. Кинетический закон Ерофеева-Аврами.

Вопрос 2. Критические индексы в теории Ландау.

Вопрос 3. Разложение потенциала Гиббса вблизи точки перехода второго рода.

Вопрос 4. Уравнение Зельдовича.

И т.д.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21886>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на зачет с оценкой:

1. Зарождение частицы новой фазы. Изменение термодинамического потенциала. Объемный и поверхностный вклад.
2. Фаза. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
3. Критический зародыш. Высота термодинамического барьера зарождения. Частота зарождения, температурная зависимость.
4. Критические индексы. Температурные зависимости теплоемкости, параметра порядка, корреляционного радиуса, корреляционной функции, восприимчивости для слабых и сильных полей.
5. Ансамбль частиц новой фазы и гетерофазных флуктуаций.
6. Разложение потенциала в ряд по степеням  $\eta$ , зависимость степени дальнего порядка от температуры вблизи точки перехода. Скачок теплоемкости.
7. Временная эволюция ансамбля частиц новой фазы.
8. Фазовые переходы второго рода. Формула Эренфеста.
9. Кинетика превращения в целом. Кинетические кривые. Диаграммы “температура-время-превращение”.
10. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода. Ограничения.
11. Локальное равновесие на межфазной границе при распаде пересыщенных растворов.
12. Кинетический закон Ерофеева-Аврами.
13. Гетерогенное зарождение новой фазы. Зарождение при конденсации жидкой фазы на твердой подложке.
14. Влияние внешнего поля на фазовый переход. Восприимчивость. Слабые и сильные поля.
15. Общие сведения о феноменологической теории фазовых переходов по Ландау. Понятие о параметре порядка.
16. Стационарная частота зарождения новой фазы.
17. Термодинамические ситуации распада пересыщенных растворов. Простой распад.
18. Уравнение Зельдовича.
19. Зарождение новой фазы при распаде пересыщенного раствора. Изменение термодинамического потенциала при зарождении частицы фазы выделения.
20. “Предвыделения”, метастабильные фазы выделения и сегрегации на кристаллических дефектах.
21. Термодинамика сверхпроводников. Фазовые переходы первого и второго рода применительно к сверхпроводникам. Теплоемкость. Сжимаемость.
22. Зарождение новой фазы при распаде пересыщенного раствора. Термодинамический стимул зарождения фазы постоянного состава в идеальном растворе.
23. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода. Разложение потенциала  $\Phi$ .
24. “Коллоидное равновесие” и возврат фазы выделения.
25. Флуктуации параметра порядка. Корреляционная функция.
26. Диаграмма Конобеевского.

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Кинетика фазовых переходов второго рода.
2. Кинетика фазовых переходов первого рода

3. Ознакомление с программным пакетом MatCalc.
4. Расчет кинетики выделения вторичных фаз, получение кинетических кривых в программном пакете MatCalc.

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовка к зачету.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика: Теория равновесных систем: термодинамика. Т.1. Изд.3, перераб. / И. А. Квасников. – URSS. 2012. – 328 с.
2. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. Изд.4 / М. Х. Карапетьянц. – URSS. 2013. – 584 с.
3. Термодинамика : учебное пособие для вузов. В 2ч. : Ч.1. основной курс / В.П. Бурдаков, Б.В. Дзюбенко, С.Ю. Меснякин, Т.В. Михайлова. – 2-е изд., пересмотр. – М. : Дрофа, 2016. – 479, [1] с.: ил.
4. Физическое материаловедение: учеб. пособие. В 3ч. Часть 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах / А.К. Федотов. – Минск: Вышш. шк., 2012 – 446 с. ISBN 978-985-06-2063-7.
5. Мукашев К. Структурные превращения в металлах и сплавах переходных групп. Palmarium Academic Publishing, 2015.

б) дополнительная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Том V. Статистическая физика. Часть I. - М.: 1976. - 584с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов в 10 т. Т X. Физическая кинетика. – 2-е изд, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.- 536 с.
3. Кацнельсон А.А., Олемской А.И.. Микроскопическая теория неоднородных структур. М.: Изд. Моск. Университета, 1987. - 332с.
4. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. - М.: Наука. 1982.- 381с.
5. Брус А., Каули Р. Структурные фазовые переходы. - М.: Мир, 1984, 352с.
6. Хачатурян А.Г. Теория фазовых переходов и структура твердых растворов. - М.: Наука. 1974. - 384с.
7. Любовь Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. - М.: Metallurgia, 1969.
8. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. - М.: Мир, 1978.
9. Бокштейн Б.С., Бокштейн З.С., Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. - М.: Metallurgia, 1976.
10. Уманский Я.С, Скаков Ю.А. Физика металлов. - М.: Атомиздат, 1978. 352с.
11. Паскаль Ю.И., Борисов С.С.. Химический формализм в теории фазовых превращений. Изд. ТГУ. 1980. - 190с.
12. Паскаль Ю.И. Термодинамика и кинетика фазовых превращений. Изд. ТГУ 1977. - 199с.
13. Смирнов Е.А. Термодинамика фазовых превращений в металлах и сплавах. Учебное пособие. М.: МИФИ, 1998. - 84с.

14. Гуров К.П. Смирнов Е.А., Шебалин А.Н. Диффузия и кинетика фазовых превращений в металлах и сплавах. М.: МИФИ, 1990 – 80 с.
15. Шепелевич В.Г. Структурно-фазовые превращения в металлах. Учеб. пособие Минск. БГУ. – 2007 169с.
16. Паскаль Ю.И. Термодинамика и кинетика фазовых превращений. -Томск: Изд-во ТГУ (ротапринт), 1977. - 200с.
17. Паскаль Ю.И. Борисов С.С. Химический формализм в теории фазовых превращений. - Томск. Изд-во ТГУ (ротапринт), 1980. - 200 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Издательство «Лань» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – СПб., 2010- . – URL: <http://e.lanbook.com/>
2. Издательство «Юрайт» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – М., 2013- . URL: <http://www.biblio-online.ru/>
3. Электронно-библиотечная система Znanium.com [Электронный ресурс] / Научно-издательский центр Инфра-М. – Электрон. дан. – М., 2012- . URL: <http://znanium.com/>
4. Электронно-библиотечная система Консультант студента [Электронный ресурс] / ООО «Политехресурс». - М, 2012- . – URL: <http://www.studentlibrary.ru/>
5. Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ [Электронный ресурс] . – Электрон. дан. – Томск, 2011-. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
6. Электронный каталог [Электронный ресурс] / НИ ТГУ, Научная библиотека ТГУ. – Электрон. дан. – Томск, 2008-2016. – URL: <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?theme=system>
7. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2000- . – URL: <http://elibrary.ru/defaultx.asp?>
8. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]: справ. правовая система. – Электрон. дан. – М., 1992- . – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
9. Гарант [Электронный ресурс] : информ.-правовое обеспечение / НПП «Гарант-Сервис». – Электрон. дан. – М., 2016. – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
10. ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – Electronic data. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>
11. SpringerLink [Electronic resource] / Springer International Publishing AG, Part of Springer Science+Business Media. – Electronic data. – Cham, Switzerland, [s. n.]. – URL: <http://link.springer.com/>
12. ProQuest Ebook Central [Electronic resource] / ProQuest LLC. – Electronic data. – Ann Arbor, MI, USA, [s. n.]. – URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tomskuniv-ebooks/home.action>

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX; системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, Waterloo Maple;  
– публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –  
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>  
– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>  
– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>  
– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>  
– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>  
– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате, оснащенные системой «Актру».

Все виды материально-информационной базы Научной библиотеки ТГУ.

Мультимедийное оборудование физического факультета ТГУ.

Программное обеспечение курсов, предшествующих изучению представленной дисциплины.

#### **15. Информация о разработчиках**

Литовченко Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.