

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна  
Должность: проректор по образовательной деятельности  
Дата подписания: 21.08.2025 10:37:47  
Уникальный программный ключ:  
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e05322d13

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»



Утверждаю:

Руководитель ООП

А.В. Солнышкин

«24» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Термодинамика и кинетика фазовых превращений**

Направление подготовки

03.04.02 Физика

профиль

Физика конденсированного состояния вещества

Для студентов

1 курса, очной формы обучения

Составитель: д.ф.-м.н., профессор Самсонов В.М.

Тверь, 2025

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

Целью освоения дисциплины является:

более детальное (по сравнению с бакалавриатом) овладение термодинамикой фазовых превращений, включая фазовые переходы второго рода, знакомство с термодинамикой дисперсных систем и изучение на ее основе термодинамики и кинетики зарождения новой фазы.

Задачами освоения дисциплины являются:

- формирование четких представлений о типах фазовых переходов и их закономерностях;
- изучение основ термодинамики дисперсных систем;
- изучение термодинамики и кинетики процессов нуклеации;
- формирование навыков аналитического и численного решения ряда задач, связанных с фазовыми равновесиями и кинетикой нуклеации.

### **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Термодинамика и кинетика фазовых превращений» относится к модулю Элективные дисциплины 1 Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Она соответствует одному из основных направлений исследований кафедры общей физики, углубляет и расширяет основы знаний по дисциплинам специализации, изучаемым в бакалавриате. Данная дисциплина тематически связана с учебной, производственной практиками, в процессе которых формируются навыки научно-исследовательской и инженерной деятельности.

**3. Объем дисциплины:** 3 зачетных единицы, 108 академических часов, в том числе:

**контактная аудиторная работа:** лекции 30 часов;

**самостоятельная работа:** 78 часов.

#### 4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

| <i>Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)</i>                                                                                                                     | <i>Планируемые результаты обучения по дисциплине</i>                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.                                                                              | УК-1.1. Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними                                                                                         |
| ПК-2. Проводит работу по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований.                                                                                                         | ПК-2.3. Проводит анализ научных данных, результатов экспериментов и наблюдений;<br>ПК-2.4. Осуществляет теоретическое обобщение научных данных, результатов экспериментов и наблюдений. |
| ПК-3. Способен выполнять проектирование и разработку продукции в части, касающейся разработки объемных нанометаллов, сплавов и композитов на их основе, а также выбора расходных и вспомогательных материалов. | ПК-3.3. Анализирует результаты испытаний образцов материалов.                                                                                                                           |
| ПК-5. Осуществление научного руководства проведением исследований по отдельным задачам.                                                                                                                        | ПК-5.2. Систематизирует и изучает научно-техническую информацию по теме исследования.                                                                                                   |

#### 5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Зачет во 2 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

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

**1.Для студентов очной формы обучения**

| Учебная программа – наименование разделов и тем                                                                                                                            | Всего<br>(час.) | Контактн<br>ая работа (час.) |              | Самостоя<br>тельная<br>работа, в<br>том числе<br>Контроль<br>(час.) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                            |                 | Лекции                       |              |                                                                     |
|                                                                                                                                                                            |                 | всего                        | в т.ч.<br>ПП |                                                                     |
| <b>1. Фазовые переходы первого и второго рода.</b><br>Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса                       | 9               | 3                            |              | 6                                                                   |
| Фазовые переходы второго рода. Уравнения Эренфеста                                                                                                                         | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Примеры фазовых переходов второго рода: переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние; переход ферромагнетик- парамагнетик, переход сегнетоэлектрик – линейный диэлектрик | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Теория Ландау фазовых переходов второго рода. Понятие о параметре порядка по Ландау. Разложение Ландау                                                                     | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| <b>2. Термодинамика нуклеации.</b> Термодинамика криволинейных границ раздела уравнений Кондо. Характеристические функции для криволинейных границ раздела.                | 9               | 3                            |              | 6                                                                   |
| Основные характеристики дисперсных систем: Степень дисперсности, асферический фактор, удельная поверхность. Теорема Вульфа.                                                | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Условия равновесия дисперсной системы. Влияние степени дисперсности на термодинамические свойства системы «Кристалл (зерно) – пар»                                         | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Размерные эффекты при плавлении и испарении малых частиц                                                                                                                   | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Работа нуклеации и ее зависимость от радиуса зародыша. Критический зародыш по Гиббсу                                                                                       | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Зарождение на ионах                                                                                                                                                        | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Зарождение на ядрах нуклеации                                                                                                                                              | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Гетерогенная конденсация на плоской подложке и ее применение в технологических процессах                                                                                   | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Кинетика гомогенной нуклеации                                                                                                                                              | 8               | 2                            |              | 6                                                                   |
| Итого                                                                                                                                                                      | 108             | 30                           |              | 78                                                                  |

**III. Образовательные технологии**

|                    |             |                            |
|--------------------|-------------|----------------------------|
| Учебная программа- | Вид занятия | Образовательные технологии |
|--------------------|-------------|----------------------------|

| наименование разделов и тем                                                                                                                                               |        |                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Фазовые переходы первого и второго рода.</b><br>Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса                      | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Фазовые переходы второго рода. Уравнения Эренфеста                                                                                                                        | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Примеры фазовых переходов второго рода: переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние; переход ферромагнетик-парамагнетик, переход сегнетоэлектрик – линейный диэлектрик | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Теория Ландау фазовых переходов второго рода. Понятие о параметре порядка по Ландау. Разложение Ландау                                                                    | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| <b>2. Термодинамика нуклеации.</b> Термодинамика криволинейных границ раздела уравнений Кондо. Характеристические функции для криволинейных границ раздела.               | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Основные характеристики дисперсных систем: Степень дисперсности, асферический фактор, удельная поверхность. Теорема Вульфа.                                               | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Условия равновесия дисперсной системы. Влияние степени дисперсности на термодинамические свойства системы «Кристалл (зерно) – пар»                                        | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач<br>Самостоятельное изучение теоретического материала |
| Размерные эффекты при плавлении и испарении малых частиц                                                                                                                  | Лекции | Активное слушание.<br>Групповое решение задач.<br>Решение индивидуальных задач                                                      |

|                                                                                          |               |                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                          |               | <i>Самостоятельное изучение теоретического материала</i>                                                                              |
| Работа нуклеации и ее зависимость от радиуса зародыша. Критический зародыш по Гиббсу     | <i>Лекции</i> | <i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач<br/>Самостоятельное изучение теоретического материала</i> |
| Зарождение на ионах                                                                      | <i>Лекции</i> | <i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач<br/>Самостоятельное изучение теоретического материала</i> |
| Зарождение на ядрах нуклеации                                                            | <i>Лекции</i> | <i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач<br/>Самостоятельное изучение теоретического материала</i> |
| Гетерогенная конденсация на плоской подложке и ее применение в технологических процессах | <i>Лекции</i> | <i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач<br/>Самостоятельное изучение теоретического материала</i> |
| Кинетика гомогенной нуклеации                                                            | <i>Лекции</i> | <i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач<br/>Самостоятельное изучение теоретического материала</i> |

#### **IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

*Форма проведения промежуточного контроля:* студенты, освоившие программу курса «Термодинамика и кинетика фазовых превращений» могут сдать зачет по итогам семестровой аттестации согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.).

**Для проведения текущей и промежуточной аттестации:**

**УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.**

УК-1.1. Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними

**Задание:**

Предложить методом нахождения теплот испарения по температурной зависимости упругости насыщенного пара.

**Способ аттестации:** устный

**Критерии оценки:**

Высокий уровень: Предложен методом нахождения теплот испарения по температурной зависимости упругости насыщенного пара, основывающийся на применении уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

Средний уровень: Метод предложен после ряда дополнительных указаний.

Низкий уровень: Знает основы термодинамики фазовых переходов, но плохо умеет применять их на практике.

**ПК-2. Проводит работу по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований.**

ПК-2.3. Проводит анализ научных данных, результатов экспериментов и наблюдений;

ПК-2.4. Осуществляет теоретическое обобщение научных данных, результатов экспериментов и наблюдений.

**Задание:**

Вывести соотношение, связывающее радиус критического зародыша со степенью пересыщения.

**Способ аттестации:**

**Критерии оценки:**

Высокий уровень: Правильно выводит и поясняет соотношение, связывающее радиус критического зародыша со степенью пересыщения.

Средний уровень: Правильно выводит соотношение, связывающее радиус критического зародыша со степенью пересыщения, но не понимает в полной мере их физического смысла и границ применимости.

Низкий уровень: С трудом выводит соотношение, связывающее радиус критического зародыша со степенью пересыщения.

**ПК-3. Способен выполнять проектирование и разработку продукции в части, касающейся разработки объемных нанометаллов, сплавов и композитов на их основе, а также выбора расходных и вспомогательных материалов.**

ПК-3.3. Анализирует результаты испытаний образцов материалов.

**Задание:**

Оценить теплоты испарения и сублимации по петлям гистерезиса плавления – кристаллизации наночастиц.

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

Высокий уровень: Правильно и аккуратно оценивает теплоты испарения и сублимации.

Средний уровень: Оценки выполнены не вполне аккуратно.

Низкий уровень: Оценки выполнены небрежно.

**ПК-5. Осуществление научного руководства проведением исследований по отдельным задачам.**

ПК-5.2. Систематизирует и изучает научно-техническую информацию по теме исследования.

**Задание:**

Подготовить презентацию по актуальному направлению термодинамики фазовых переходов.

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

Высокий уровень: Презентация подготовлена на высоком уровне, ее представление также заслуживает высокой оценки

Средний уровень: Презентация подготовлена на высоком уровне, но ее представление не заслуживает высокой оценки.

Низкий уровень: Имеется ряд замечаний как по самой презентации, так и по ее представлению.

## **V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **1) Рекомендуемая литература**

1. Буданов, В. В. Химическая термодинамика : учебное пособие / В. В. Буданов, А. И. Максимов. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 320 с. — ISBN 978-5-8114-2271-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/209705>
2. Буданов, В. В. Химическая кинетика : учебное пособие / В. В. Буданов, Т. Н. Ломова, В. В. Рыбкин. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1542-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/211475>

### **б) дополнительная литература:**

1. Бланк В. Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. - Москва Физматлит, 2011. - 412 с.: ил., схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9221-1319-9 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457645>
2. Камышов В. М. Строение вещества: учебное пособие / В. М. Камышов, Е. Г. Мирошникова, В. П. Татауров. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 236 с. — [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/90007>

### **2) Программное обеспечение**

Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows

Adobe Acrobat Reader

Google Chrome

Notepad++

Многофункциональный редактор ONLYOFFICE

OpenOffice

3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1.ЭБС«ZNANIUM.COM» [www.znanium.com](http://www.znanium.com);

2.ЭБС «Университетская библиотека онлайн»<https://biblioclub.ru/>;

3.ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Научная электронная библиотека eLibrary.ru;

Электронная база данных диссертаций РГБ;

## **VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

### **1. Контрольные вопросы по дисциплине:**

1. Понятие о термодинамической фазе и фазовых переходах. Примеры фазовых переходов. Агрегатные состояния вещества. Аллотропные модификации.
2. Диаграммы состояния вещества.
3. Фазовый переход как следствие потери устойчивости одной из фаз. Фазовые переходы I и II рода.
4. Фазовые переходы I рода. Уравнение Клайперона-Клаузиуса.
5. Фазовые переходы II рода. Уравнения Эренфеста.
6. Переход ферромагнетик-парамагнетик.
7. Фазовые переходы сегнетоэлектрик-парафаза.
8. Теория Ландау фазовых переходов II рода. Понятие параметра порядка по Ландау.
9. Разложение Ландау для свободной энергии Гиббса.
10. Различные классификации дисперсных систем. Степень дисперсности. Фактор асферичности.
11. Гомогенное зарождение жидкого аэрозоля.
12. Гетерогенное зарождение на ионах.

13. Типы ядер конденсации. Гетерогенное зарождение на ядрах конденсации.
14. Гетерогенное зарождение на совершенной плоской подложке.
15. Тонкопленочная технология.
16. Эпитаксиальная технология.

## 2. Указания к самостоятельной работе студентов.

| ТЕМА                                                                | Источник из списка дополнительной литературы |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Фактор асферичности. Гомогенное зарождение жидкого аэрозоля         | 5, с. 22-25                                  |
| Гетерогенное зарождение на ионах                                    | 5, с. 25-28                                  |
| Гетерогенное зарождение на совершенной плоской подложке             | 5, с. 28-33                                  |
| Типы ядер конденсации. Гетерогенное зарождение на ядрах конденсации | 6, с. 33-43                                  |
| Тонкопленочная технология                                           | 8, гл. 1, § 4, С. 110-170.                   |
| Эпитаксиальная технология                                           | 8, гл. 1, § 3, С. 53-109.                    |

## 3. Оценка сформированности компетенций

1. Понятие о термодинамической фазе и фазовых переходах. Примеры фазовых переходов. Агрегатные состояния вещества. Аллотропные модификации.
2. Диаграммы состояния вещества.
3. Фазовый переход как следствие потери устойчивости одной из фаз. Фазовые переходы I и II рода.
4. Фазовые переходы I рода. Уравнение Клайперона-Клаузиуса.
5. Фазовые переходы II рода. Уравнения Эренфеста.
6. Переход ферромагнетик-парамагнетик.
7. Фазовые переход сегнетоэлектрик-парафаза.

8. Теория Ландау фазовых переходов II рода. Понятие параметра порядка по Ландау.
9. Разложение Ландау для свободной энергии Гиббса.
10. Различные классификации дисперсных систем. Степень дисперсности.
11. Фактор асферичности. Гомогенное зарождение жидкого аэрозоля
12. Гетерогенное зарождение на ионах
13. Гетерогенное зарождение на совершенной плоской подложке
14. Типы ядер конденсации. Гетерогенное зарождение на ядрах конденсации
15. Расчет скачка теплоемкостей при переходе металла из нормального состояние в сверхпроводящее и сравнение результата с экспериментальными данными по теплоемкости металлов при низких температурах. Выбор металла – по указанию преподавателя
16. Молекулярно-динамическое моделирование плавления и кристаллизации металлических наночастиц. Нахождение комплекса термодинамических характеристик: температур плавления и кристаллизации, теплот плавления и кристаллизации, энтропий плавления и кристаллизации.
17. Молекулярно-динамическое моделирование тонкопленочной и эпитаксиальной технологий.

## VII. Материально-техническое обеспечение

| Наименование специальных помещений                                                                                                   | Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы                                                                                                                                                                                                                                                          | Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Базовая учебная лаборатория общей физики. Лаборатория молекулярной физики №211 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35) | 1. Монитор 17" LG Flatron 1751SQ-SN Silver-Black 8ms TFT TCO 03<br>2. Принтер лазерный HP LJ 1005 (14 стр./мин)<br>3. Экран настенный Screen Media 153*203(M082-08150)<br>4. Экран настенный Screen Media 213*213(M082-08157)<br>5. Компьютер (DEPO Neos 420MD WP/OF Pro AE/E4600/2*1G/DDR667/160G/DV16/FDD/KBb/Монитор LCD BenQ17 | Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows<br>Adobe Acrobat Reader<br>Google Chrome<br>OpenOffice<br>Notepad++<br>Многофункциональный редактор ONLYOFFICE<br>VLC media player |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  | 6 Компьютер<br>7 Установка для определения<br>определнния коэф. диффузии<br>воздуха и водяного пара ФПТ 1-4<br>8 Установка для измерения<br>теплоты парообразования ФПТ 1-<br>10<br>9 Установка для определения<br>универсальной газовой постоянной<br>ФПТ 1-12<br>10 Установка для определения<br>коэф. теплопроводности воздуха<br>ФПТ 1-3<br>11 Установка для определения<br>коэффициента вязкости воздуха<br>ФПТ 1-1<br>12 Установка для определения<br>энтропии при плавлении олова<br>ФПТ 1-11<br>13 Установка для изучения<br>зависимости скорости звука от<br>температуры ФПТ 1-7<br>14 Установка для исследования<br>теплоёмкости твердого тела ФПТ<br>1-8<br>15 Компьютер iRU Corp 510 I5-<br>2400/4096/500/G210-512/DVD-<br>RW/W7S/монитор E-Machines<br>E220HQVB 21.5" (2 шт)<br>16 Установка для определения<br>отношения теплоемкостей воздуха<br>при постоянном давлении и объеме<br>ФПТ 1-6<br>17 Уравнение состояния<br>идеального газа с применением<br>ПК<br>18 Демонстрационный набор по<br>термодинамике<br>19 Установка для формирования и<br>измерения температур МЛИ-2 |  |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

### **VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

| № п.п. | Обновленный раздел<br>рабочей программы<br>дисциплины | Описание внесенных<br>изменений | Реквизиты документа,<br>утвердившего<br>изменения |
|--------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.     |                                                       |                                 |                                                   |
| 2.     |                                                       |                                 |                                                   |