

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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Кинетика фазовых превращений

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
Фундаментальная и прикладная физика

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

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. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

По дисциплине «Кинетика фазовых превращений» предусмотрены семинарские занятия (коллоквиумы) по разделам курса: Темы 1-2 (ИПК 1.1, ИОПК 2.2) и практические занятия в компьютерном классе (ИПК 1.1, ИОПК 2.2). Открытый перечень основных вопросов практических занятий размещены в системе LMS Moodle ТГУ (Learning Management System Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) по ссылке:

- <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21886>

Основные вопросы семинарских занятий составлены на основе разделов курса. Дополнительные вопросы к ним составлены на основе тематик подразделов. Контрольная точка проводится не менее двух раз в семестр.

План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. «Феноменологическая теория фазовых переходов второго рода».
2. «Кинетика фазовых переходов первого рода».
3. «Кинетика превращения в целом. Кинетический закон Ерофеева - Авраами».
4. Получение кинетических кривых в реальном времени и распределения частиц M_3C при компьютерном моделировании выделения цементита в стали в программном пакете MatCalc.

Примеры основных вопросов на коллоквиуме:

1. Зарождение частицы новой фазы. Изменение термодинамического потенциала. Объемный и поверхностный вклад.
2. Критический зародыш. Высота термодинамического барьера зарождения. Частота зарождения, температурная зависимость.

Примеры дополнительных вопросов по тематикам подразделов.

1. Представить графическую зависимость от размера частицы объемного и поверхностного вкладов в изменение термодинамического потенциала
2. Определение критического зародыша

Студенты предоставляют ответ на основной вопрос в устной форме. Ответы на дополнительные вопросы также должны быть представлены в устной форме.

Промежуточная аттестация включает в себя активность студента на коллоквиумах: 3 коллоквиума по (0-10 баллов) за каждый, итого 0-30 баллов в сумме за коллоквиумы. За ответ на один основной вопрос студент может получить 4-5 баллов (правильный ответ - 5

баллов, незначительные неточности в ответе - 4 балла). За правильный ответ на дополнительный вопрос – 1 балл. За успешное решение задачи по получению кинетической кривой и распределения частиц M_3C в программном пакете MatCalc дается 10 баллов. К зачету и экзамену допускаются только студенты, успешно прошедшие промежуточную аттестацию.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Экзамен в восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам и последующего устного опроса. Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие компетенции ИПК 1.1, ИОПК 2.2. Для уточнения сформированных компетенций ИПК 1.1 и ИОПК 2.2 в процессе сдачи экзамена студенту задаются дополнительные вопросы по всему пройденному материалу. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Примерный перечень вопросов к экзамену:

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 η , 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 Φ .

24. “Коллоидное равновесие “ и возврат фазы выделения.
25. Флуктуации параметра порядка. Корреляционная функция.
26. Диаграмма Конобеевского.

На промежуточную аттестацию планируется не более 40 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам промежуточной аттестации и баллов, набранных на экзамене.

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

Зачет с оценкой определяется исходя из результатов экзамена и промежуточной 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».

Количество баллов	Результат, продемонстрированный студентом на экзамене
86-100	Выставляется студенту, твердо знающему материал, грамотно и по существу излагающему его, умеющему применять полученные знания на практике, способному самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность.
66-85	Выставляется студенту, твердо знающему материал, грамотно и по существу излагающему его, умеющему применять полученные знания на практике, но допускающему некритичные неточности в ответе
51-65	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирующему базовые понятия.
0-50	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины

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.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Краткие теоретические вопросы по всему курсу, позволяющие оценить уровень сформированных компетенций ИОПК 2.2 и ИПК 1.1.

1. Определение фазовых переходов I и II рода.

Ответ:

При фазовых переходах первого рода разрыв терпят первые производные от термодинамических потенциалов (ΔS и ΔV), при фазовых переходах второго рода – вторые производные от термодинамических потенциалов (ΔC_p , $\Delta \alpha_p$ и т.д.) при непрерывных первых производных.

2. Привести примеры фазовых переходов II-го рода. В каких случаях возможен переход от фазовых переходов II-го рода к фазовым переходам I-го рода.

Ответ:

Примеры: переходы из сверхпроводящего состояния в нормальное, переход сверхтекучей и нормальной компоненты в жидком гелии, переходы с изменением симметрии в твердых телах. Включение поля может приводить к изменению вида перехода от фазовых переходов II-го рода к фазовым переходам I-го рода.

3. Записать разложение потенциала Гиббса вблизи точки фазового перехода второго рода по теории Ландау.

Ответ:

$$\Phi(P, T, \eta) = \Phi_0 + \alpha\eta + A\eta^2 + C\eta^3 + B\eta^4 + \dots,$$

4. Определение критических индексов в теории Ландау.

Ответ:

Критические индексы — это показатели степени в зависимостях типа:

$$C_p \sim |t|^{-\alpha}, \quad \eta \sim (-t)^\beta, \quad \chi \sim |t|^{-\gamma}, \dots$$

5. Сформулируйте изменение термодинамического потенциала при образовании зародыша новой фазы, из каких вкладов оно состоит

Ответ:

$$\Delta\Phi = V^\beta (\rho^\beta \varphi_\infty^\beta - \rho^\alpha \varphi^\alpha) + G\sigma, \quad \text{или} \quad \Delta\Phi(n) = n(\varphi_\infty^\beta - \varphi^\alpha) + \chi n^{2/3} \sigma,$$

состоит из 2-х вкладов - объемного и поверхностного.

6. Краткое описание процесса эволюции ансамбля частиц новой фазы.

Ответ:

Если $Z(n, t)$ - функция распределения частиц по количеству атомов (n) и по времени (t), диффузионный поток $J(n, t)$ в n -пространстве через сечение этого пространства, расположенное между n -ой и $n+1$ -ой точками (поатомное изменение количества атомов новой фазы),

тогда уравнение непрерывности в n - пространстве:

$$\frac{\partial Z(n, t)}{\partial t} = - \frac{\partial J(n, t)}{\partial n},$$

уравнение Зельдовича:

$$\frac{\partial Z(n, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left[D(n) \rho Z_\infty(n) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{Z(n, t)}{Z_\infty(n)} \right) \right] - \text{дифференциальное уравнение}$$

диффузии в n -пространстве описывает эволюцию ансамбля частиц новой

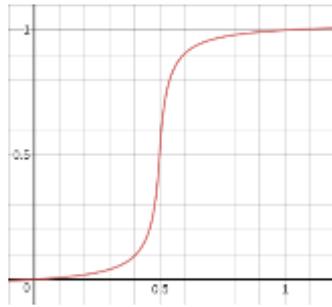
7. Изобразить схематически сигмоидальную кривую, объяснить, что она отображает, записать формулу кинетической кривой, объяснить, от чего зависит ее вид.

Ответ:

Сигмоидальная (S) кривая отражает изменение количества новой фазы в зависимости от времени.

$$\gamma^\alpha(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} v_G^3 J_{з\text{ар}} t^4\right)$$

Изменение положения и формы кинетической кривой с температурой определено температурной зависимостью $v_G^3 J_{з\text{ар}}$.



8. Записать кинетическое уравнение Ерофеева – Аврамян, чем определяется степенной показатель m .

Ответ:

$$\gamma(t) = 1 - \exp(-kt^m), \quad \text{показатель } m$$

определяется формой частиц (шар, цилиндр) и механизмом их роста (по радиусу, или в длину).

9. В чем различие гомогенного и гетерогенного механизмов зарождения частиц. Привести примеры для твердых тел.

Ответ:

Гомогенное зарождение происходит с одинаковой вероятностью в любой точке исходной фазы, гетерогенное зарождение происходит в выделенных местах исходной фазы, и оно энергетически выгоднее. В твердых телах такими местами являются дислокации, включения других фаз, границы зерен и двойников.

10. Объяснить понятие распада пересыщенного твердого раствора, как при этом изменяется концентрация второго компонента в бинарной системе?

Ответ:

Будучи закаленным от высокой температуры T_1 до низкой T_2 , раствор оказывается пересыщенным, метастабильным. Он изотермически при T_2 превращается со временем в двухфазное состояние. Такое превращение и называется распадом пересыщенного раствора. Концентрация второго компонента при этом уменьшается от закаленного (пересыщенного) состояния до равновесного состояния.

Информация о разработчиках

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