

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

**Термодинамика фазовых равновесий**

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

Томск – 2025

## **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 «Термодинамика фазовых равновесий» предусмотрены семинарские занятия (коллоквиумы) по разделам курса: Темы 1-9 (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 ссылкам: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22018> и

<https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22019>. 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. Равновесие фаз в однокомпонентной системе.
2. Равновесие фаз в многокомпонентной системе.
3. Термодинамика растворов-I.
4. Диаграммы состояния.
5. Термодинамика растворов-II.
6. Термодинамическая теория твердого состояния.
7. Термодинамика межфазных границ.
8. Термодинамические стимулы фазовых превращений.

Примеры основных вопросов на коллоквиуме:

1. Общее начало термодинамики. Механическая аналогия термодинамического равновесия. Термодинамические параметры (экстенсивные, интенсивные, мольные).
2. Второе начало термодинамики для обратимых процессов. Энтропия. Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Принцип компенсации. Диссипация энергии.

Примеры дополнительных вопросов по тематикам подразделов.

1. Записать основные термодинамические равенства.
2. Записать формулы изобарной и изохорной теплоемкости
3. Чем определяется качественный вид термодинамических потенциалов.

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: 4 коллоквиума по (0-10 баллов) за каждый в первом и втором семестре по отдельности, итого 0-40 баллов за каждый семестр. 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. К зачету и экзамену допускаются только студенты, успешно прошедшие промежуточную аттестацию.

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

**Зачет в 5 семестре** проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие компетенции ИПК 1.1, ИОПК 2.2. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы по всему пройденному материалу, направленные на проверку достижения ИПК 1.1 и ИОПК 2.2. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов, выносимых на зачет

1. Система и среда. Общее начало термодинамики.
2. Механическая аналогия термодинамического равновесия.
3. Термодинамические параметры.
4. Обратимые и необратимые процессы.
5. Функции состояния. Нулевое начало термодинамики.
6. Теплота и работа.
7. Первое начало термодинамики.
8. Второе начало термодинамики для обратимых процессов. Энтропия.
9. Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Принцип компенсации. Диссипация энергии.
10. Тепловой двигатель.
11. Третье начало термодинамики.
12. Основное термодинамическое равенство. Различные варианты записи основного термодинамического равенства.
13. Термодинамические потенциалы их свойства.
14. Дифференциалы термодинамических потенциалов.
15. Теплоемкость.
16. Первые производные от термодинамических потенциалов по характерным параметрам.
17. Вторые производные от термодинамических потенциалов. Характеристики вещества.
18. Свойства якобианов. Соотношения между  $c_p$  и  $c_v$ .
19. Условия термодинамического равновесия. Потенциал Максвелла-Гюи.
20. Условия устойчивости термодинамического равновесия.
21. Качественный вид термодинамических функций.
22. Однокомпонентная открытая система. Химический потенциал.
23. Многокомпонентная открытая система. Химический потенциал.
24. Уравнение Гиббса-Дюгема, пример двухкомпонентной системы.
25. Равновесие двух фаз в системе с нефиксированными экстенсивными параметрами. Изменение экстенсивных параметров системы.
26. Диаграмма состояния Т-Р. Скрытая теплота превращения. Скрытая механическая работа превращения.
27. Условия механического равновесия фаз. Запрет на межфазный перенос вещества.

28. Равновесие двух фаз в системе с фиксированными параметрами. В изохорной системе. В адиабатической системе.
29. Двухфазное равновесие в замкнутой системе. Совместное рассмотрение механического и вещественного равновесия и их устойчивости в изохорно-изотермической системе.
30. Графическое изображение двухфазного равновесия. График Т-Р. Изобарное сечение трехмерного графика. Изотермическое сечение.
31. Уравнение Клаузиуса – Клапейрона.
32. Диаграммы состояния типа Р-V с областью двухфазности. Вариантность однофазного и двухфазного равновесия.
33. Правило коноды для однокомпонентной системы. Изохорные и адиабатические переходы.
34. Правило отрезков.
35. Равновесие в системе жидкость газ. Двухфазное равновесие.
36. Графическое изображение состава многокомпонентной системы. Треугольник, тетраэдр, симплекс концентраций. Особые сечения.
37. Растворы. Мольные парциальные функции. Экстенсивные параметры раствора. Формулы аддитивности. Обобщенное соотношение Гиббса-Дюгема.
38. Функции смешения. Теплота смешения, энтропия смешения, Термодинамический стимул смешения. Идеальные растворы.
39. Равновесие раствора, устойчивость равновесия.
40. Энергия смешения раствора. Модель регулярных растворов.
41. Диаграммы состояния металлических систем.

Критерии формирования оценки: при сдаче зачета суммируются баллы, полученные на промежуточной аттестации (суммарный бал за участие в коллоквиумах) и баллы, полученные собственно на зачете.

<b>Количество баллов</b>	<b>Результат, продемонстрированный студентом на зачете</b>
41-60	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.
31-40	Выставляется студенту, твердо знающему материал, грамотно и по существу излагающему его, умеющему применять полученные знания на практике, но допускающему не критичные неточности в ответе
11-30	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирующему базовые понятия.
0-10	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины

Соответствие суммарной рейтинговой оценки по сто балльной шкале классической шкале зачет/не зачет:

- 0-50 баллов – «не зачет»;
- 51-70 баллов – «зачет»;
- 71-80 баллов – «зачет»;
- 81-100 баллов – «зачет».

**Экзамен в 6 семестре** проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Экзаменационный билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие компетенции ИПК 1.1, ИОПК 2.2. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы, направленные на проверку достижения ИПК 1.1 и ИОПК 2.2.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по задаются по всему содержанию курса за 2 семестра. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Критерии формирования оценки: при сдаче экзамена суммируются баллы, полученные на промежуточной аттестации за 2-й семестр (суммарный балл за участие в коллоквиумах) и баллы, полученные собственно за экзамен. К экзамену допускаются студенты, успешно прошедшие промежуточную аттестацию.

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

Экзаменационная оценка 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»; 65-51 – «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 не критичные 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

### Открытый перечень вопросов, выносимых на экзамен.

#### Билет №1

Вопрос 1. Фазовое расслоение двухкомпонентного регулярного твердого раствора. Условия диффузионной неустойчивости твердого раствора. Диаграмма состояния (Т-С).

Вопрос 2. Закон Рауля и Генри для предельно разбавленных растворов. Обобщение этих законов на случай неидеальной газовой фазы

#### Билет №2

Вопрос 1. Анализ поведения двухкомпонентных регулярных твердых растворов. График  $\varphi_{смеш}(c)$  и его особые точки.

Вопрос 2. Вторые производные от термодинамических потенциалов. Характеристики вещества.

#### Билет №3

Вопрос 1. Начала термодинамики (общее, I, II, III), обратимые и необратимые процессы, энтропия.

Вопрос 2. Диаграммы состояния металлических систем. Различные виды диаграмм. Эвтектика, перитектика, растворимость. Правило фаз Гиббса.

Билет №4

Вопрос 1. Графическое изображение двухфазного равновесия Трехмерный график ( $\phi$ - $p$ - $T$ ). Изобарное сечение ( $\phi$ - $T$ ). Изобара  $S(T)$ . Скачек теплоемкости  $C_p(T)$ . Метастабильные состояния. Изотермическое сечение  $\phi(p)$ . Изотерма объема  $V(P)$ .

Вопрос 2. Формализм Льюиса. Фугитивности и активности компонентов раствора. Коэффициент активности.

Билет №5

Вопрос 1. Энергия Гиббса и химические потенциалы раствора идеальных газов.

Вопрос 2. Парадокс Гиббса и его решение, предложенное Гиббсом.

Билет №6

Вопрос 1. Теплоемкость (адиабатическая, изотермическая, изохорная, изобарная).

Вопрос 2. Энергия смешения двухкомпонентного раствора. Энергия смешения при полном конфигурационном беспорядке. Произвольное количество компонентов. Мольная парциальная энергия смешения раствора.

Билет №7

Вопрос 1. Правило коноды для однокомпонентной системы. Изохорные и адиабатические переходы. Конода на графике ( $f$ - $v$ ) и ( $h$ - $s$ ). Правило отрезков.

Вопрос 2. Сравнение диаграмм состояния различного типа..

Билет №8

Вопрос 1. Парциальный объем и парциальное давление газов. Закон Дальтона, Амаго. Парциальная энтальпия идеальных газов. Энтропия смешения идеальных газов.

Вопрос 2. Уравнение Гиббса-Дюгема, пример двухкомпонентной системы.

Билет №9

Вопрос 1. Регулярные растворы. Химическое взаимодействие и термодинамические свойства растворов.

Вопрос 2. Диаграмма состояния  $T$ - $P$ . Скрытая теплота превращения. Скрытая механическая работа превращения.

Билет №10

Вопрос 1. Равновесие раствора, устойчивость равновесия.

Вопрос 2. Равновесие в системе жидкость газ. Двухфазное равновесие. Уравнение Ван-дер-Ваальса (критическая точка, изотермы). Диаграмма состояния  $P$ - $v$ , бинодаль, спинодаль.

Билет №11

Вопрос 1. Однокомпонентная открытая система. Химический потенциал. Выражения для химического потенциала, полученные из термодинамических потенциалов: внутренней энергии, энтальпии, свободной энергии, энтропии, потенциала Гиббса.

Вопрос 2. Функции смешения. Теплота смешения, энтропия смешения, Термодинамический стимул смешения. Идеальные растворы.

Билет №12

Вопрос 1. Термодинамика поверхностей раздела. Поверхностное натяжение. Внутренние границы раздела фаз.

Вопрос 2. Растворы. Мольные парциальные функции. Экстенсивные параметры раствора. Формулы аддитивности. Обобщенное соотношение Гиббса-Дюгема.

Билет №13

Вопрос 1. Стандартное состояние. Эндотермические и экзотермические растворы. Энтропия смешения. Термодинамические стимулы смешения. Конфигурационная энтропия.

Вопрос 2. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Диаграммы состояния типа p-v с областью двухфазности. Вариантность однофазного и двухфазного равновесия.

Билет №14

Вопрос 1. Термодинамические стимулы фазовых превращений. Классификация превращений. Термодинамика зарождения фаз. Термодинамика мартенситных превращений.

Вопрос 2. Термодинамические параметры (экстенсивные, интенсивные, удельные, интенсивные меры равновесия, транзитивность равновесия, внутренние и внешние параметры).

Билет №14

Вопрос 1. Графическое изображение состава многокомпонентной системы. Треугольник, тетраэдр, симплекс концентраций. Особые сечения.

Вопрос 2. Закон Рауля, выраженный в терминах формализма Льюиса.

Примеры дополнительных вопросов промежуточной аттестации в форме экзамена:

Вопрос 1. Начала термодинамики (I, II, III).

Вопрос 2. Мольные парциальные функции.

Вопрос 3. Уравнение Гиббса-Дюгема.

Вопрос 4. Основные термодинамические равенства (записать и объяснить).

И т.д.

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

Краткие теоретические вопросы по всему курсу за 2 семестра, позволяющие оценить уровень сформированных компетенций ИОПК 2.2 и ИПК 1.1.

1. Сформулируйте начала термодинамики (I, II, III).

*Ответ:*

I-е начало:

$$dU = \delta Q - \delta A$$

II-е начало:

$$dS = \delta Q/T$$

III -е начало:

При стремлении температуры к абсолютному нулю энтропия всякой равновесной системы при изотермических процессах перестает зависеть от каких-либо параметров и при T=0 К принимает одну и ту же постоянную величину для всех систем (абсолютный нуль недостижим).

2. Сформулируйте основные термодинамические равенства:

*Ответ:*

$$dU = TdS - pdV;$$

$$dH = TdS + Vdp;$$

$$dF = -SdT - pdV;$$

$$d\Phi = -SdT + Vdp$$

3. Сформулируйте понятие об изобарной и изохорной теплоемкости

*Ответ:*

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p ;$$

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_v .$$

4. Условия термодинамического равновесия.

*Ответ:*

Минимум соответствующего термодинамического потенциала (равенство нулю первого дифференциала и положительный знак второго дифференциала).

$$dU=0 \quad d^2U > 0 \text{ при } S, V = \text{const};$$

$$dH=0 \quad d^2H > 0 \text{ при } S, p = \text{const};$$

$$dF=0 \quad d^2F > 0 \text{ при } T, V = \text{const};$$

$$d\Phi=0 \quad d^2\Phi > 0 \text{ при } T, p = \text{const}$$

5. Чем определяется качественный вид термодинамических потенциалов?

*Ответ:*

Первыми и вторыми производными от потенциала по соответствующим параметрам аргументам (наклон касательной к кривой в точке и выпуклость, или вогнутость функции).

6. Сформулируйте понятие химического потенциала.

*Ответ:*

Химический потенциал – это интенсивная мера вещественного равновесия и в однокомпонентной системе он равен мольному потенциалу Гиббса.

7. Условия равновесия двух фаз в системе с нефиксированными экстенсивными параметрами.

*Ответ:*

Равенство температур, равенство давлений, равенство химических потенциалов фаз, обе фазы должны быть устойчиво равновесны.

8. Сформулируйте уравнение Гиббса-Дюгема

*Ответ:*

$$\sum_i n_i d\mu_i + SdT - VdP = 0$$

9. Сформулируйте уравнение Клапейрона - Клаузиуса.

*Ответ:*

$$\frac{dp_0}{dT_0} = \frac{s^\beta - s^\alpha}{v^\beta - v^\alpha} = \frac{\Delta s}{\Delta v} = \frac{\Delta Q}{T_0 \Delta v}$$

10. Что такое конода, и на каких графиках ее можно построить?

*Ответ:*

Конода, это общая касательная к графикам двух фаз, и она обозначает область двухфазного равновесия. Конода строится на графиках  $f-v$  и  $h-s$ .

11. Сформулируйте понятие раствора, что такое мольные парциальные функции?

*Ответ:*

раствор – любая макроскопическая и однородная фаза переменного состава.

Мольная парциальная функция – производная типа  $(\bar{\epsilon}_i)_{T,P} = \left( \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_{j \neq i}}$ ,

описывающая поведение  $i$ -го компонента в растворе.

12. Сформулируйте понятие функций смешения, приведите примеры.

*Ответ:*



Изменение экстенсивной функции, отсчитанное от нулевого (до образования раствора состояния) есть функция смешения

$$\mathcal{E}_{CM} = \mathcal{E} - \mathcal{E}^0 = \mathcal{E} - \sum_{i=1}^K n_i \mathcal{E}_i^0, \text{ например - энтальпия смешения } H_{CM} = H - H^0,$$

$$\text{энергия Гиббса } \Phi_{CM} = \Phi - \Phi^0$$

13. Сформулируйте понятие идеального раствора.

Ответ:

Это раствор, в котором отсутствует взаимодействие и у него идеальная энтропия:

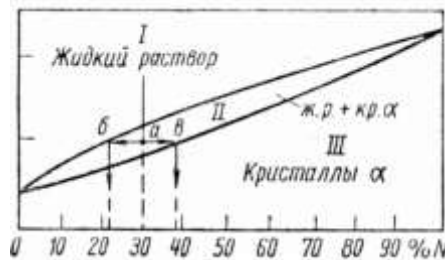
$$\bar{h}_{i,CM} = 0, \bar{s}_{i,CM} = s_{i,CM}^{ud} = -R \ln c_i, \text{ или } h_{CM} = 0, s_{CM} = s_{CM}^{ud} = -R \sum_i c_i \ln c_i$$

14. Сформулируйте основные допущения модели регулярных твердых растворов

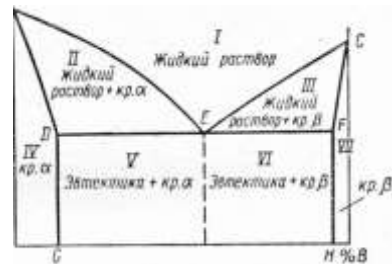
Ответ:

1. Энергия раствора состоит только из потенциальной части, а последняя может быть представлена в виде суммы энергий взаимодействия всех пар атомов (суммирование по всем координационным сферам).
  2. Энергии взаимодействия пар атомов принимаются независимыми от конкретного окружения данной пары атомов, т.е. от состава раствора; от степени порядка (дальнего или ближнего), а также от температуры и давления.
15. Диаграммы состояния. Изобразить схематически диаграммы состояния для полной растворимости в твердом состоянии (а), ограниченной растворимости (б) и химического соединения (в).

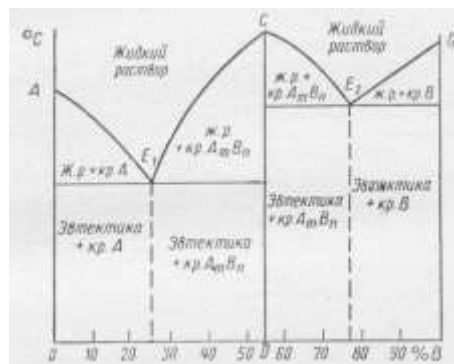
Ответ:



(а)



(б)



(в)

16. Сформулируйте основные понятия формализма Льюиса: фугитивность, активность и коэффициент активности раствора.

Ответ:

$$f_i = P_i \exp\left(\frac{\mu_i - \mu_i^{ид}}{RT}\right); a_i = \exp[\mu_{i,см}/(RT)]; \gamma_i = a_i/C_i$$

17. Сформулируйте закон Рауля. Отклонения от закона Рауля – положительные и отрицательные растворы.

*Ответ:*

$P_i = c_i^K P_i^0$  ; при отклонение от линейной зависимости - положительные растворы -  $P_i > c_i^K P_i^0$  и отрицательные растворы -  $P_i < c_i^K P_i^0$  .

18. Сформулируйте закон Генри

*Ответ:*

$$P_i = c_i^K H_i(T, P)$$

19. Сформулируйте понятие поверхностного натяжения.

*Ответ:*

Поверхностное натяжение численно равно энергии Гиббса поверхности, если обе эти величины выражены в единицах одного типа.

20. Сформулируйте понятие термодинамического стимула фазового превращения и от чего он зависит.

*Ответ:*

Термодинамический стимул фазового превращения — это разница в энергии Гиббса двух фаз, он зависит от отклонения температуры от температуры равновесия фаз (степень переохлаждения, или степень перегрева).

### **Информация о разработчиках)**

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