

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
материаловедения и индустрии наносистем  
Академик РАН

  
В.М. Иевлев  
*подпись, расшифровка подписи*

23.05.2023 г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Б1.О.21 Термодинамика неравновесных процессов**

- 1. Код и наименование направления подготовки/специальности:** 04.03.02 Химия, физика и механика материалов
- 2. Профиль подготовки/специализация:** материаловедение и индустрия наносистем
- 3. Квалификация выпускника:** бакалавр
- 4. Форма обучения:** очная
- 5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:** кафедра материаловедения и индустрии наносистем
- 6. Составители программы:** Кострюков Виктор Федорович, доктор химических наук, доцент
- 7. Рекомендована:** научно-методическим советом химического факультета, протокол №4 от 25.04.2023

---

*отметки о продлении вносятся вручную)*

---

**8. Учебный год:** 2026-2027

**Семестр(ы):** 7

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целью освоения дисциплины «Термодинамика неравновесных процессов» является ознакомление студентов с современным представлением о термодинамике неравновесных необратимых процессов и формирование на его основе научного, творческого подхода к решению практических задач, связанных с нестационарными, неравновесными потоками вещества, энергии и заряда в открытых физико-химических системах.

Задачами, решаемыми в процессе преподавания дисциплины, являются:

- получение знаний о современных методологических научных подходах, реализуемых в неравновесной термодинамике и применимых к описанию большого количества физико-химических процессов и явлений в природе, технике и промышленности;
- изучение основных законов и уравнений неравновесной термодинамики, их обоснования и методов использования при решении фундаментальных и прикладных задач;
- формирование умений применения основных соотношений термодинамики необратимых процессов в теории неравновесных фазовых превращений и неравновесного структурообразования;
- приобретение навыков по использованию полученных знаний для установления однозначной связи между потоками физических величин (массы, энергии, заряда и т.д.) и внешними силами, действующими на систему, и применению этих навыков для решения прикладных задач материаловедения;
- ознакомление будущих бакалавров с современными достижениями естественных наук, тесно связанных с неравновесной термодинамикой: методологиями нелинейной динамики, детерминированного хаоса, теории самоорганизации, прикладной синергетики.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Б1. Часть, формируемая участниками образовательных отношений.

Дисциплина «Термодинамика неравновесных процессов» является обязательной дисциплиной вариативной части. Дисциплина «Термодинамика неравновесных процессов» опирается на следующие дисциплины:

- Физическая химия;
- Неорганическая химия;
- Органическая химия;
- Физика;

Кинетика синтеза твердофазных материалов

- Химическая физика твердого тела.

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способен использовать при решении задач профессиональной деятельности понимание теоретических основ химии, физики материалов и механики материалов	ОПК-1.1	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы физико-химии полупроводниковых материалов	Знать: балансовые уравнения, характеризующие процессы переноса массы, импульса, энергии, заряда, энтропии и т.д.; принцип локального термодинамического равновесия, его обоснование; закон возрастания энтропии в результате необратимых процессов, его обоснование; основные законы, полученные в рамках линейной термодинамики необратимых процессов (теорема Кюри, соотношения взаимности Онзагера); Уметь: записывать систему уравнений, описывающую состояние неравновесной

				сплошной среды; определять потоки и силы, существующие в неравновесных системах, подразделять их на скалярные, векторные и тензорные; устанавливать связи между потоками и силами; вычислять производство энтропии и диссипации энергии в открытых системах, анализировать их эволюцию; Владеть: терминологией в области термодинамики неравновесных процессов
		ОПК-1.2.	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы структурной химии неорганических материалов	Знать: основные современные методологические и экспериментальные подходы к решению задач термодинамики неравновесных процессов; Уметь: использовать на практике современные представления наук о материалах, о влиянии микро- и наномасштаба на свойства материалов, взаимодействии материалов с окружающей средой Владеть методикой экспериментального определения направления эволюции неравновесной термодинамической системы
		ОПК-1.3.	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы механики материалов	Знать: Взаимосвязь типа химической связи, кристаллической структуры, микроструктуры и зонной структуры со свойствами полупроводниковых и сверхпроводящих материалов. Уметь: Применять теоретические знания для решения практических задач неравновесной термодинамики, в том числе для наноматериалов. Владеть: Навыками исследования механических свойств полупроводниковых и сверхпроводящих материалов, а также наноматериалов
		ОПК-1.4.	Предлагает интерпретацию результатов экспериментов и расчетно-теоретических работ с использованием теоретических основ химии, физики и механики материалов	Знать: обобщенные законы процессов переноса, полученные в рамках линейной теории; критерии эволюции и устойчивости открытых неравновесных термодинамических систем; условия возникновения и существования диссипативных структур. Уметь: приводить примеры диссипативных структур из областей физики, химии, биологии, материаловедения. Владеть: навыками дискуссии по профессиональной тематике с использованием понятий и законов термодинамики неравновесных процессов; навыками по самостоятельному изучению и пониманию специальной, научной, справочной и методической литературы, связанной с проблемами неравновесной термодинамики.

## 12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час — 2/72

Форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой.

## 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость
--------------------	--------------

		Всего	По семестрам		
			№ семестра	№ семестра 6	...
Контактная работа					
в том числе:	лекции	34		34	
	практические	16		16	
	лабораторные				
	курсовая работа				
Самостоятельная работа		22		22	
Промежуточная аттестация					
Итого:		72		72	

### 13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Введение в неравновесную термодинамику. Второе начало термодинамики в открытых системах	Цель и задачи спецкурса. Роль термодинамики в физике. Термодинамика равновесных процессов и неравновесная термодинамика. Обратимые и необратимые процессы. Изменение энтропии открытой системы. Скорость производства энтропии и диссипации энергии в открытой системе. Термодинамическое сопряжение процессов.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
1.2	Движущие силы и скорости необратимых процессов	Соотношение между значениями движущих сил и скоростей процессов. Термодинамическая форма записи кинетических уравнений. Величины термодинамических сил для химической реакции, потоков градиентов температуры, концентрации, химического потенциала, напряженности электрического поля. Элементарные химические процессы и брутто-процессы. Связь между стационарной скоростью брутто-процесса и термодинамическими силами. Условие кинетической необратимости химической реакции. Скорость-определяющая и скорость-лимитирующая стадии. Вычисление кажущейся энергии активации брутто-процесса.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
1.3	Термодинамика систем вблизи равновесия (линейная термодинамика)	Соотношения Онзагера. Вычисление коэффициентов взаимности Онзагера для химической реакции. Термодинамические критерии устойчивости стационарных состояний. Критерий эволюции Пригожина. Биологические приложения. Термомеханический эффект.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
1.4	Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика)	Общие критерии устойчивости стационарных состояний. Методы и оценки термодинамической устойчивости стационарных состояний для химических реакций. Универсальный критерий эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Термодинамика нелинейных	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>

		кинетических систем: термодинамическая и кинетическая ветвь решений. Устойчивость решений по Ляпунову. Точка бифуркации. Функционал стационарного состояния для химических реакций. Модифицированные уравнения Онзагера для сопряженных химических реакций вдали от равновесия. Пространственные, временные и пространственно-временные диссипативные структуры. Примеры появления диссипативных структур в каталитических системах. Изменение условий сосуществования фаз в ходе химической реакции.	
1.5	Энтропия и информация	Иерархия процессов по временным факторам. Связь энтропии и биологической информации. Рецепция и возникновение информации.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
<b>2. Практические занятия</b>			
2.1	Введение в неравновесную термодинамику. Второе начало термодинамики в открытых системах	Цель и задачи спецкурса. Роль термодинамики в физике. Термодинамика равновесных процессов и неравновесная термодинамика. Обратимые и необратимые процессы. Изменение энтропии открытой системы. Скорость производства энтропии и диссипации энергии в открытой системе. Термодинамическое сопряжение процессов.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
2.2	Движущие силы и скорости необратимых процессов	Соотношение между значениями движущих сил и скоростей процессов. Термодинамическая форма записи кинетических уравнений. Величины термодинамических сил для химической реакции, потоков градиентов температуры, концентрации, химического потенциала, напряженности электрического поля. Элементарные химические процессы и брутто-процессы. Связь между стационарной скоростью брутто-процесса и термодинамическими силами. Условие кинетической необратимости химической реакции. Скорость-определяющая и скорость-лимитирующая стадии. Вычисление кажущейся энергии активации брутто-процесса.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
2.3	Термодинамика систем вблизи равновесия (линейная термодинамика)	Соотношения Онзагера. Вычисление коэффициентов взаимности Онзагера для химической реакции. Термодинамические критерии устойчивости стационарных состояний. Критерий эволюции Пригожина. Биологические приложения. Термомеханический эффект.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>
2.4	Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика)	Общие критерии устойчивости стационарных состояний. Методы и оценки термодинамической устойчивости стационарных состояний для химических реакций. Универсальный критерий эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Термодинамика нелинейных кинетических систем: термодинамическая и кинетическая ветвь решений. Устойчивость решений по Ляпунову. Точка бифуркации. Функционал стационарного состояния для химических реакций. Модифицированные уравнения Онзагера для сопряженных химических реакций вдали от равновесия. Пространственные, временные и пространственно-временные диссипативные структуры. Примеры появления диссипативных структур в каталитических системах. Изменение условий сосуществования фаз в ходе химической	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>

		реакции.	
2.5	Энтропия и информация	Иерархия процессов по временным факторам. Связь энтропии и биологической информации. Рецепция и возникновение информации.	<a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314</a>

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение в неравновесную термодинамику. Второе начало термодинамики в открытых системах	4	2		3	9
2	Движущие силы и скорости необратимых процессов	6	3		4	13
3	Термодинамика систем вблизи равновесия (линейная термодинамика)	8	3		4	15
4	Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика)	10	5		7	22
5	Энтропия и информация	6	3		4	13
Итого:		34	16		22	72

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для успешного освоения дисциплины, необходимо

- изучение основных и дополнительных литературных источников;
- подготовка рефератов с целью более детального изучения вопросов, рассматриваемых на лекциях;
- текущий контроль успеваемости в форме устного опроса.

### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Агеев Е.П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах / Агеев Е.П. — Москва: МЦНВО, 2005. — 384 с. — <URL: <a href="http://www.knigafund.ru/">http://www.knigafund.ru/</a> >
2	Базаров И.П. Термодинамика. /Базаров И.П. – СПб: Лань. – 2010. – 376 с.
3	Пригожин И, Стенгерс И. Порядок из хаоса / Пригожин И., Стенгерс И. — Москва: Прогресс, 1986.— 224 с. <URL: <a href="http://www.scintific.narod.ru/nlib/&gt;">http://www.scintific.narod.ru/nlib/&gt;</a> .

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Гуров К.П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов. М.: Наука, 1978. 126 с.
5	Гроот С.Р., де Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964. 271с
6	Р. Хаазе, Термодинамика необратимых процессов, Мир, М., 1967. 543с

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Источник
-------	----------

7	<a href="http://www.elibrary.ru">http://www.elibrary.ru</a> – научная электронная библиотека.
8	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – Зональная научная библиотека ВГУ.

## 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник

## 17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

Проведение текущей аттестации и самостоятельной работы по отдельным разделам дисциплины.

ЭУМК <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=11314>

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Ноутбук, мультимедийный проектор, экран

## 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Введение в неравновесную термодинамику. Второе начало термодинамики в открытых системах	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4	Реферат, устный опрос на практической занятии
2.	Движущие силы и скорости необратимых процессов	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4	Реферат, устный опрос на практической занятии
3.	Термодинамика систем вблизи равновесия (линейная термодинамика)	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4	Реферат, устный опрос на практической занятии
4.	Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика)	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4	Реферат, устный опрос на практической занятии
5.	Энтропия и информация	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4	Реферат, устный опрос на практической занятии
Промежуточная аттестация форма контроля - зачет с оценкой				Перечень вопросов

## **20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания**

### **20.1 Текущий контроль успеваемости**

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

#### **Темы рефератов:**

1. Диффузия и теплопроводность в многокомпонентных смесях.
2. Явление термодиффузии.
3. Диффузионный термоэффект.
4. Эффект Зеебека.
5. Эффект Пельтье.
6. Обобщенный закон Фика.
7. Обобщенный закон Ома.
8. Вязкость. Сдвиговая вязкость.
9. Торсионная вязкость. Объемная вязкость.
10. Обобщенный закон Ньютона.
11. Тензоры теплопроводности и электропроводности в анизотропных средах.
12. Химическое сродство и скорость реакции.
13. Неравновесные фазовые переходы
14. Хаос в термодинамических системах.
15. Автоколебательные системы
16. Явления самоорганизации в физике.
17. Явления самоорганизации в химии.
18. Явления самоорганизации в биологии.
19. Бифуркации.
20. Диссипативные структуры.
21. Синергетика.
22. Фракталы

#### **Описание технологии проведения.**

Рефераты оформляются в печатном (или электронном) виде. Основные положения реферата зачитываются на практических занятиях с возможностью конспектирования наиболее существенных моментов. Время, отводимое на устный доклад около 20-30 минут.

#### **Требования к выполнению заданий (или шкалы и критерии оценивания).**

Реферат оценивается по глубине раскрытия темы.

### **20.2 Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: собеседование по билетам к зачету.

#### **Перечень вопросов к зачету и порядок формирования КИМ:**

---

1. Термодинамические системы. Их характеристика и классификация.
2. Равновесные и неравновесные состояния.
3. Локальное термодинамическое равновесие.



- 
4. Причины необратимости. Типы необратимых процессов.
  5. Статистический смысл энтропии.
  6. Изменение энтропии в изолированных системах.
  7. Изменение энтропии в открытых системах.
  8. Второй закон термодинамики для открытых систем.
  9. Время в неравновесной термодинамике.
  10. Скорость производства энтропии и диссипация энергии в открытой системе.
  11. Стационарные состояния
  12. Термодинамическое сопряжение процессов.
  13. Термодинамика равновесных процессов и неравновесная термодинамика.
  14. Обобщенные силы и обобщенные потоки
  15. Линейная взаимосвязь обобщенных сил и потоков.
  16. Коэффициенты Онзагера.
  17. Взаимодействие потоков и сил в формализме Онзагера.
  18. Примеры связанных потоков. Перекрестные явления переноса.
  19. Теорема Пригожина.
  20. Термодинамические критерии устойчивости стационарных состояний.
  21. Нелинейные неравновесные процессы в открытых системах.
  22. Элементарные химические процессы и брутто-процессы.
  23. Условие кинетической необратимости химической реакции.
  24. Универсальный критерий эволюции Гленсдорфа-Пригожина.
  25. Биологические приложения критерия эволюции Пригожина
  26. Бифуркации
  27. Диссипативные структуры.
  28. Энтропия и информация.

*В каждом КИМ по 2 вопроса.*

#### Описание технологии проведения.

После получения студентом билета КИМ и бланка листа ответа, самостоятельно выполняются задания КИМ в письменной форме. Время подготовки 40 минут. При выставлении итоговой оценки по промежуточной аттестации учитывается активность и успешность работы студента на этапах текущего контроля успеваемости.

#### Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания.

Оценка “отлично” ставится если студент дает полный и правильный ответ, раскрывая теоретические и практические аспекты вопроса, анализируя литературные источники по данному вопросу, аргументирует собственную позицию по данному вопросу

Оценка “хорошо” ставится если студент допускает несущественные ошибки, испытывает трудности при определении собственной оценочной позиции

Оценка “удовлетворительно” ставится если студент допускает существенные ошибки, нарушена логика изложения материала, требуются наводящие вопросы преподавателя

Оценка “неудовлетворительно” ставится при незнании или непонимании большей или наиболее существенной части содержания учебного материала

### **20.3 Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ**

ОПК-1 Способен использовать при решении задач профессиональной деятельности понимание теоретических основ химии, физики материалов и механики материалов

**Перечень заданий для оценки сформированности компетенции:**

Задания с развернутым ответом (повышенная сложность)

1. Сформулируйте основные положения термодинамики неравновесных процессов

1) возможность разбиения процессов, происходящих в системе, на внешние (контролируемые внешними к системе силами) и внутренние («самопроизвольные»);

2) возможность сопряжения (взаимовлияния) различных термодинамических процессов, «самопроизвольно» и одновременно протекающих внутри системы;

3) принципиальная важность понятия устойчивости неравновесного состояния системы.

2. Запишите математическое выражение для реализации в системе стационарного состояния  $dS/dt=0$ , если  $d_e S/dt < 0$  и  $|d_e S/dt| = d_i S/dt$ .

3. Запишите уравнение взаимности Онзагера для случая 2-х взаимодействующих процессов.

$$J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2;$$

$$J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2,$$

4. Сформулируйте теорему Пригожина.

**При неизменных внешних условиях в стационарном состоянии открытой системы, близкой к термодинамическому равновесию, скорость производства энтропии является постоянной, положительной и минимальной.**

5. Дайте определение диссипативных структур.

**Диссипативные структуры - это открытые системы, находящиеся вдали от состояния термодинамического равновесия, в которых возможно возникновение упорядоченных состояний.**

**Критерии и шкалы оценивания заданий ФОС:**

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный).

2) открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности):

- 2 балла – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный).

3) открытые задания (мини-кейсы, средний уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание

выполнено не полностью, но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или, в случае если задание состоит из нескольких подзаданий, верно выполнено 50% таких подзаданий;

- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (получен неправильный ответ, ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки).

**Задания раздела 20.3 рекомендуются к использованию при проведении диагностических работ с целью оценки остаточных результатов освоения данной дисциплины (знаний, умений, навыков).**