

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики неравновесных процессов**



ПТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н
В.Е.Блинов
2022 г.

Рабочая программа дисциплины

НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	72	22	10		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу,
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	5
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	6
5. Перечень учебной литературы.	10
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	11
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	11
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	11
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	12
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	12

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Учебный курс «Неравновесная термодинамика и законы излучения» направлен на обучение студентов кафедры физики неравновесных процессов, получивших базовую подготовку по общефизическим дисциплинам, и продолжающих изучать термодинамику и статистическую физику.

Дисциплина ориентирована на студентов третьего курса физического факультета, освоивших базовый уровень общефизической подготовки и продолжающих изучать термодинамику, статистическую физику и квантовую механику. На кафедре физики неравновесных процессов данный курс традиционно состоит из двух частей. Первая часть - неравновесная термодинамика, вторая часть – законы излучения. Курс призван дать студентам кафедры представление о неравновесной термодинамике, научить решать широкий класс задач, подготовить понятийную базу для освоения различных курсов теоретической физики и курсов, связанных с тепло- и массопереносом, включая теорию радиационного теплообмена, а также сформировать общекультурные и профессиональные навыки.

Цели курса - дать представление о теории термодинамической устойчивости и теории термодинамических флуктуаций, о неравновесных и необратимых процессах. Большое внимание уделяется второму началу термодинамики, понятию энтропии. Рассматриваются диссипативные процессы и производство энтропии, их роль в неравновесной термодинамике, кинетические коэффициенты для различных неравновесных процессов, соотношения Онзагера, теорема *Пригожина* о минимальном производстве энтропии для стационарных состояний. Особое внимание уделено рассмотрению диссипативных процессов в газовой динамике (производство энтропии в Навье-Стоксовском газе), термодиффузионных и термомеханических, термоэлектрических и термомагнитных процессов. В курсе рассматривается теория обобщенной восприимчивости, соотношения Крамерса-Кронига, связь вещественной и мнимой частей диэлектрической проницаемости между собой и с производством энтропии. Вторая часть курса посвящена законам излучения, и включает в себя рассмотрение законов равновесного излучения, различных радиационных и излучательных процессов, и введение в кинетические процессы излучения.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с про-</p>	Знать 1-ое начало термодинамики и уравнения состояния, 2-ое начало термодинамики в различных формулировках, термодинамические функции (потенциалы), термодинамическое и статистическое определение энтропии; теорию термодинамической устойчивости и термодинамических флуктуаций, термодинамические неравенства; что такое производство энтропии и диссипативные процессы; теорию Онзагера неравновесной термодинамики; правило Кюри о связи процессов различной тензорной размерности; различные процессы, приводящие к излучению и поглощению фотонов; законы равновесного излучения, распределение Планка, закон Стефана-Больцмана

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
	<p>филем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>и закон смещения Вина, законы Кирхгофа для поверхностей и объёмов. Иметь представление: о термодиффузионных, термомеханических, термоэлектрических и термомагнитных процессах; о производстве энтропии в диссипативных процессах; о коэффициентах Эйнштейна для излучения; о кинетическом уравнении для распространения излучения и приближенных методах его решения (разложение по полиномам Лежандра, диффузионное приближение, метод Шустера и Чандрасекхара, приближение Росселанда и Планка); базовые разделы неравновесной термодинамики: основные понятия, модели, законы и теории; теоретические и методологические основы и способы их использования при решении научно-инновационных задач.</p> <p>Уметь использовать метод якобианов для получения термодинамических соотношений для квазистатических процессов, вычислять термодинамические неравенства для различных термодинамических, определять термодинамические флуктуации; решать типовые учебные задачи по основным разделам неравновесной термодинамики; применять полученную теоретическую базу для решения научно-инновационных задач, грамотно работать с научной литературой с использованием новых информационных технологий; применять полученные теоретические знания для самостоятельного освоения специальных разделов неравновесной термодинамики, необходимых в профессиональной деятельности; определять необходимость привлечения дополнительных знаний из специальных разделов неравновесной термодинамики для решения научно-инновационных задач; применять знания неравновесной термодинамики для анализа и обработки результатов физических экспериментов; проводить анализ научной и технической информации в области</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		<p>неравновесной термодинамики и смежных дисциплин.</p> <p>Владеть техникой вычисления кинетических коэффициентов для различных неравновесных процессов, техникой использования соотношений Крамерса-Кронига для определения обобщенной восприимчивости для различных систем; навыками самостоятельной работы с учебной литературой по базовым разделам неравновесной термодинамики; основной терминологией и понятийным аппаратом базовых разделов неравновесной термодинамики; навыками решения базовых задач по неравновесной термодинамике; основными методами научных исследований; навыками использования теоретических основ базовых разделов неравновесной термодинамики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области неравновесной термодинамики и смежных дисциплин.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Курс «Неравновесная термодинамика и законы излучения» читается студентам кафедры физики неравновесных процессов в весеннем семестре 3 курса параллельно с курсом «Термодинамика и статистическая физика». Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики неравновесных процессов. В настоящей программе учтено, что многие вопросы равновесной термодинамики студенты изучали в курсе «Молекулярная физика», осваивают при выполнении лабораторных и курсовых работ на практикуме.

Студенты должны иметь знания по общей физике, классической механике и электродинамике, знания основных положений и принципов квантовой механики, без чего невозможно усвоить разнообразные излучаемые процессы. По математическим дисциплинам необходимы знания основ линейной алгебры и математического анализа, теории комплексных переменных и преобразований Фурье, необходимо умение решать простые дифференциальные уравнения, умение применять эти знания при решении задач.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	72	22	10		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения, подготовка реферата.
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 22 часов;
 - практические занятия – 10 часов;
 - самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
 - промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.
- Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов.

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

п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Термодинамические системы, нулевое начало термодинамики. Первое начало термодинамики. Второе начало термодинамики. Энтропия. Термодинамические потенциалы и термодинамические коэффициенты.	1	2	2			
2	Теория термодинамической устойчивости и термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье – Брауна.	2	2	2			
3	Теория флуктуаций и случайные процессы.	3	4	2		2	
4	Термодинамическая теория необратимых процессов. Производство энтропии в гидродинамических системах (уравнения Навье-Стокса).	4	4	1	1	2	
5	Диффузия, теплопроводность, вязкость, термодиффузия (эффект Соре).	5	4	2		2	
6	Термомеханические явления - формула Пуазейля, эффект Джоуля-Томсона, изоэнтропическое перетекание (турбина Капицы), фонтанирование жидкости.	6	4	1	1	2	
7	Термоэлектрические эффекты. Термо ЭДС (явление Зеебека), эффект Пельтье, эффект Томсона.	7	4	2		2	
8	Терромагнитные явления. Эффект Реги-Ледюка, эффект Холла, эффект Эттингсхаузена.	8	4	1	1	2	
9	Обобщенная восприимчивость и спектральные разложения. Динамическая восприимчивость. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига.	9	2	1	1		
10	Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.	10	4	2		2	
11	Теория и законы излучения. Теория равновесного излучения. Распределение Планка, закон Стефана-Больцмана, закон смещения Вина.	11	2	1	1		
12	Законы излучения Кирхгофа, закон Ламберта.	12	4	1	1	2	

	Вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна.						
13	Излучательные и поглощательные процессы.	13	4	1	1	2	
14	Уравнение переноса излучения. Локальное равновесие и приближение лучистого теплообмена. Излучение от полупространства и от слоя конечной толщины.	14	2	1	1		
15	Методы решения кинетического уравнения для излучения. Приближение «вперед-назад», разложение по сферическим гармоникам. Приближение Росселанда и Планка.	15	4	1	1	2	
16	Неравновесное излучение низкотемпературной плазмы. Элементы физики лазеров.	16	4	1	1	2	
17	Консультации		2				2
18	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
19	Экзамен		2				2
Всего			72	22	10	18	22

Программа и основное содержание лекций (22 часов)

I. Неравновесная термодинамика.

1. Равновесная термодинамика.

- 1.1. Термодинамические системы и переменные, нулевое начало термодинамики. Работа и теплота, уравнения состояния вещества. Первое начало термодинамики.
- 1.2. Внутренняя энергия - функция состояния. Второе начало термодинамики (различные формулировки). Энтропия. Эквивалентность PV - и TS -плоскостей.
- 1.3. Термодинамические функции (потенциалы) и условия термодинамического равновесия. Полные дифференциалы, и преобразование Лежандра. Свободная энергия Гельмгольца, потенциал Гиббса, химический потенциал, Ω -потенциал. Уравнение Гиббса-Дюгема.

2. Теория термодинамической стабильности.

- 2.1. Метод Якобианов, термодинамические коэффициенты, соотношения Максвелла. Экстремальные свойства термодинамических потенциалов.
- 2.2. Теория термодинамической устойчивости.
- 2.3. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье – Брауна.

3. Теория флуктуаций и случайные процессы.

- 3.1. Общая формула (Эйнштейна) для вероятности флуктуационного отклонения от равновесного состояния.
- 3.2. Термодинамические флуктуации.
- 3.3. Флуктуации в классических системах.
- 3.4. Спектральные представления для случайной переменной и корреляционной функции.

4. Термодинамическая теория необратимых процессов.

- 4.1. Общий формализм. Второе начало для неквазистатических процессов. Квадратичная форма для отклонения энтропии от равновесия.
- 4.2. Термодинамические силы и термодинамические потоки в линейном приближении.
- 4.3. Уравнение баланса массы, импульса, энергии и энтропии.

- 4.4. Производство энтропии в гидродинамических системах (уравнения Навье-Стокса) для смесей химически реагирующих газов. Закон действующих масс.
- 4.5. Соотношения взаимности Онзагера для кинетических коэффициентов: $L_{ik}=L_{ki}$.
- 4.6. Принцип Кюри. Связь между кинетическими коэффициентами различной тензорной размерности.
- 4.7. Принцип Ле-Шателье – Брауна с точки зрения неравновесной термодинамики.
- 4.8. Теорема о минимуме производства энтропии для стационарных состояний.

5. Примеры применения теории Онзагера.

- 5.1. Термодиффузионные процессы.
- 5.1. Диффузия, теплопроводность, вязкость, термодиффузия (эффекты Соре и Дюфура).
- 5.2. Производство энтропии в термодиффузионных процессах.

6. Термомеханические явления.

- 6.1. Течение Пуазейля,
- 6.2. Эффект Джоуля-Томсона,
- 6.3. Изозэнтропическое перетекание (турбина Капицы),
- 6.4. Фонтанирование жидкости.

7. Термоэлектрические эффекты.

- 7.1. Термо ЭДС (явление Зеебека) – возникновение разности потенциала на концах разомкнутой электрической цепи, когда спаи проводников поддерживаются при разных температурах.
- 7.2. Эффект Пельтье – выделение тепла при прохождении тока через спаи различных проводников в изотермической системе.
- 7.3. Эффект Томсона – перенос тепла электрическим током вдоль однородного проводника при наличии перепада температуры.
- 7.4. Производство энтропии в термоэлектрических процессах.

8. Термомагнитные явления.

- 8.1. Эффект Реги-Ледюка – возникновение вторичной разности температур в проводнике с градиентом температур, помещенном в магнитное поле.
- 8.2. Эффект Холла – возникновение электрического поля, перпендикулярного плотности тока и магнитному полю.
- 8.3. Эффект Эттингсхаузена – возникновение градиента температуры в проводнике с током под действием магнитного поля.

9. Обобщенная восприимчивость и спектральные разложения.

- 9.1. Системы с памятью. Принцип причинности.
- 9.2. Спектральные представления для силы, отклика, восприимчивости.
- 9.3. Динамическая восприимчивость. Аналитические свойства $\chi(\omega)$. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига.
- 9.4. Связь спектральных представлений для кинетических коэффициентов Онзагера с динамической восприимчивостью. Условие на обобщенную динамическую восприимчивость:
 $\omega \text{Im} \chi(\omega) = \omega \chi''(\omega) > 0$.

10. Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.

- 10.1. Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.
- 10.2. Периодические воздействия. Стационарные колебания системы под воздействием внешней силы.
- 10.3. Диэлектрическая проницаемость и поглощение света.

II. Законы излучения.

11. Теория равновесного излучения. Теория и законы излучения. Теория равновесного излучения. Распределение Планка, закон Стефана-Больцмана, закон смещения Вина.

12. Законы излучения Кирхгофа.

12.1. Законы излучения Кирхгофа для поверхностей. Закон Ламберта.

12.2. Вынужденное излучение в классической и квантовой теориях. Коэффициенты Эйнштейна.

13. Излучательные и поглощательные процессы.

13.1. Рассеяние, поглощение и испускание излучения в газах. Типы электронных переходов.

13.2. Свободно-свободные переходы. Тормозное излучение. Свободносвязанные переходы. Фотоионизация и фоторекомбинация.

13.3. Связанно-связанные переходы. Излучательные переходы между дискретными уровнями атомов и молекул. Спектры атомов и молекул.

13.4. Рэлеевское и рамановское (комбинационное) рассеяние. Рассеяние Манделъштама-Бриллюэна (роль флуктуаций, акустических и фононных колебаний в среде).

13.5. Уширение спектральных линий. Форма спектральных линий. Распространение излучения в плазме. Распространение резонансного излучения в слабоионизованной плазме.

Программа практических занятий (10 часов)

14. Уравнение переноса излучения.

14.1. Локальное равновесие и приближение лучистого теплообмена.

14.2. Излучение от полупространства и от слоя конечной толщины.

Уравнение переноса излучения.

15. Методы решения кинетического уравнения для излучения.

15.1. Разложение по сферическим гармоникам.

15.2. Приближение «вперед-назад» (Шустера), и приближение Чандрасекхара.

15.3. Диффузионное приближение, приближение Росселанда и Планка.

16. Неравновесное излучение

16.1. Излучение низкотемпературной плазмы.

16.2. Элементы физики лазеров. CO₂ лазер.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	6
Подготовка к контрольным работам	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература

1. Ю.Б. Румер, М.Ш. Рывкин. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск, Изд. НГУ, 2000, Глава X.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М. «Наука», 1976.

5.2. Дополнительная литература

1. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Том X. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Физическая кинетика. - М.: «Наука», 1979.
2. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. «Наука», 1966. (Главы II, V).
3. Д.Н. Зубарев. Неравновесная статистическая термодинамика. М. «Мир», 1971.
4. С. де Гроот, П.Мазур, Неравновесная термодинамика. М. ИЛ, 1964.
5. В.В. Соболев. Курс теоретической астрофизики. М. «Наука», 1975.
6. Р. Качмарек. Введение в физику лазеров. М. «Мир», 1981.
7. Р. Кубо. Термодинамика, - М. : «Мир», 1970.
8. И.А. Квасников. Термодинамика и статистическая физика. Теория неравновесных систем. Москва, Издательство Московского Университета, 2002, Глава I, IV.
9. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. М. «Наука», 1976.
10. К.Хир. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. - М.: «Мир», 1976.
11. В.Г. Севастьяненко. Перенос излучения. Учебное пособие. Новосибирск, НГУ. 1979

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Ю.Б. Румер, М.Ш. Рывкин. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск, Изд. НГУ, 2000, Глава X.
2. В.Г. Севастьяненко. Перенос излучения. Учебное пособие. Новосибирск, НГУ. 1979

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Неравновесная термодинамика и законы излучения» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Реализация дисциплины осуществляется с применением электронного обучения на платформе Zoom где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины;

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения коротких самостоятельных работ в начале каждого занятия с решением типовых задач, разобранных на предыдущем занятии.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция сформирована ПК-1 не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области неравновесной термодинамики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p>	<p>Знать 1-ое начало термодинамики и уравнения состояния, 2-ое начало термодинамики в различных формулировках, термодинамические функции (потенциалы), термодинамическое и статистическое определение энтропии; теорию термодинамической устойчивости и термодинамических флуктуаций, термодинамические неравенства; что такое производство энтропии и диссипативные процессы; теорию Онзагера неравновесной термодинамики; правило Кюри о связи процессов различной тензорной размерности; различные процессы, приводящие к излучению и поглощению фотонов; законы равновесного излучения, распределение Планка, закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина, законы Кирхгофа для поверхностей и объёмов. Иметь представление: о термодиффузионных, термомеханических, термоэлектрических и термомагнитных процессах; о производстве энтропии в диссипативных процессах; о коэффициентах Эйнштейна для излучения; о кинетическом уравнении для распространения излучения и приближенных методах его решения (разложение по полиномам Лежандра, диффузионное приближение, метод Шустера и Чандрасекхара, приближение Росселанда и Планка); базовые разделы неравновесной термодинамики: основные понятия, модели, законы и теории; теоретические и методологические основы и способы их использования при решении научно-инновационных задач.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзамен.</p>

<p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области</p>	<p>Уметь использовать метод якобианов для получения термодинамических соотношений для квазистатических процессов, вычислять термодинамические неравенства для различных термодинамических, определять термодинамические флуктуации; решать типовые учебные задачи по основным разделам неравновесной термодинамики; применять полученную теоретическую базу для решения научно-инновационных задач, грамотно работать с научной литературой с использованием новых информационных технологий; применять полученные теоретические знания для самостоятельного освоения специальных разделов неравновесной термодинамики, необходимых в профессиональной деятельности; определять необходимость привлечения дополнительных знаний из специальных разделов неравновесной термодинамики для решения научно-инновационных задач; применять знания неравновесной термодинамики для анализа и обработки результатов физических экспериментов; проводить анализ научной и технической информации в области неравновесной термодинамики и смежных дисциплин.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзаменов.</p>
<p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Владеть техникой вычисления кинетических коэффициентов для различных неравновесных процессов, техникой использования соотношений Крамера-Кронига для определения обобщенной восприимчивости для различных систем; навыками самостоятельной работы с учебной литературой по базовым разделам неравновесной термодинамики; основной терминологией и понятийным аппаратом базовых разделов неравновесной термодинамики; навыками решения базовых задач по неравновесной термодинамике; основными методами научных исследований; навыками использования теоретических основ базовых разделов неравновесной термодинамики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзаменов.</p>

	научной и технической информации в области неравновесной термодинамики и смежных дисциплин.	
--	---	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Неравновесная термодинамика и законы излучения».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы вопросов и задач для подготовки к экзамену:

1. Микроканоническое, каноническое и большое каноническое распределения.
2. Теория термодинамической стабильности.
3. Термодинамические неравенства.
4. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье – Брауна.
5. Общая формула для вероятности флуктуационного отклонения от равновесного состояния.
6. Химический потенциал. Флуктуации плотности.

7. Соотношения взаимности Онзагера для кинетических коэффициентов: $L_{ik}=L_{ki}$.
8. Термодинамические силы и термодинамические потоки в линейном приближении.
9. Принцип Кюри. Связь между кинетическими коэффициентами различной тензорной размерности.
10. Производство энтропии. Выражение через термодинамические силы и потоки.
11. Производство энтропии в вязком теплопроводном газе.
12. Аналитические свойства динамической восприимчивости. Соотношения Крамерса-Кронига.
13. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига для динамической восприимчивости.
14. Системы с памятью. Принцип причинности. Динамическая восприимчивость.
15. Отклик колебательной системы на периодические воздействия.
16. Производство энтропии. Выражение через термодинамические силы и потоки.
17. Соотношения Онзагера. Диффузия, теплопроводность, вязкость, термодиффузия.
18. Производство энтропии в вязком теплопроводном газе.
19. Диффузия, теплопроводность, термодиффузия (эффект Соре).
20. Термомеханические явления.
21. Термоэлектрические эффекты. Термо-ЭДС (явление Зеебека).
22. Термоэлектрические эффекты. Эффект Пельтье.
23. Термоэлектрические эффекты. Эффект Томсона.
24. Термомагнитные явления. Эффекты Регги-Ледюка и Холла.
25. Законы Кирхгофа и закон Ламберта для излучения.
26. Законы Кирхгофа для поверхностей.
27. Законы Кирхгофа для излучения для объёма газа или плазмы.
28. Кинетическое уравнение для излучения.
29. Диффузионное приближение для решения кинетического уравнения лучистого переноса.
30. Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.
31. Производство энтропии. Составляющие различной тензорной размерности.
32. Распределение Планка для равновесного излучения.
33. Закон смещения Вина и закон Стефана-Больцмана.
34. Приближения Планка и Росселанда для кинетического уравнения лучистого переноса.
35. Излучение от полупространства и от слоя конечной толщины.
36. Коэффициенты Эйнштейна для излучения. Инверсная заселенность.
37. Кинетическое уравнение для излучения в приближении ЛТР.

Написание рефератов по курсу «Неравновесная термодинамика и законы излучения».

За время семестра для получения положительной итоговой оценки студентам предлагается написать реферат на одну из тем курса. При подготовке доклада студент должен углубленно изучить тему, ознакомиться с соответствующими публикациями в научных журналах и подготовить 20 минутный доклад. Доклад представляется перед всей группой в форме электронной презентации. Во время презентации доклада студент должен продемонстрировать понимание и знание не только заданной темы, но и ее связь с тематикой курса. В ряде случаев предлагается написание одного реферата на двух студентов, что может способствовать развитию навыков коллективного творчества.

Примерный список рефератов (срок сдачи, 25 мая):

- 1. Термодиффузионные процессы. Эффекты Соре и Дюфора.
- 2. Сдвиговая и объёмная вязкость в газах и жидкостях.
- 3. Эффект Зеебека. Термопары.
- 4. Эффект Пельтье.

- 5. Эффект Томсона.
- 6. Термомеханические явления. Эффект фонтанирования.
- 6. Дросселирование и изоэнтропическое перетекание. Турбина Капицы, турбодетандер.
- 7. Термомагнитные явления. Эффект Холла, Нернста, Эттингсхаузена и Реги-Ледюка .
- 8. Термомагнитные явления и теория Онзагера.
- 9. Соотношение Крамерса-Кронига.
- 10. Диэлектрическая проницаемость и поглощение света.
- 11. Равновесное излучение в наном мире и в космосе (от переизлучения крупных молекул до реликтового излучения).
- 12. Теория Ми.
- 13. Различные виды излучения.
- 14. Броуновское движение и диффузия.
- 15. Производство энтропии и мнимая часть обобщенной восприимчивости.
- 16. Производство энтропии в разреженном газе и соотношения Онзагера.
- 17. Принцип наименьшего рассеяния энергии Онзагера и принцип наименьшего производства энтропии.

Экзаменационные билеты по курсу «Неравновесная термодинамика и законы излучения».

Билет № 1.

- 1. Теория термодинамической стабильности.**
- 2. Распределение Планка для равновесного излучения.**

Билет № 2.

- 1. Производство энтропии. Выражение через термодинамические силы и потоки.**
- 2. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного и вынужденного излучения.**

Билет № 3.

1. Термоэлектрические эффекты. Термо-ЭДС (явление Зеебека).
2. Законы Кирхгофа для поверхностей.

Билет № 4.

1. Термоэлектрические эффекты. Эффект Пельтье.
2. Закон смещения Вина равновесного излучения.

Билет № 5.

1. Термоэлектрические эффекты. Эффект Томсона.
2. Кинетическое уравнение для излучения.

Билет № 6.

1. Принцип Кюри. Связь между кинетическими коэффициентами различной тензорной размерности.
2. Производство энтропии в вязком теплопроводном газе.

Билет № 7.

1. Термомагнитные явления. Эффекты Реги-Ледюка и Холла.
2. Диффузионное приближение для решения кинетического уравнения лучистого переноса.

Билет № 8.

1. Принцип Ле-Шателье – Брауна с точки зрения неравновесной термодинамики.
2. Отклик колебательной системы на периодические воздействия.

Билет № 9.

1. Соотношения Онзагера. Диффузия, теплопроводность, вязкость, термодиффузия.
2. Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.

Билет № 10.

1. Производство энтропии. Составляющие различной тензорной размерности.
2. Приближения Планка и Росселанда для кинетического уравнения лучистого переноса.

Билет № 11.

1. Связь производства энтропии с мнимой частью динамической восприимчивости.
2. Излучение от полупространства и от слоя конечной толщины.

Билет № 12.

1. Закон смещения Вина и закон Стефана-Больцмана.
2. Термоэлектрические эффекты. Эффект Пельтье.

Билет № 13.

1. Термодинамические неравенства и принцип Ле-Шателье – Брауна.
2. Коэффициенты Эйнштейна для излучения. Инверсная заселенность.

Билет № 14.

1. Диффузия, теплопроводность, термодиффузия (эффект Соре).
2. Кинетическое уравнение для излучения в приближении ЛТР

Билет № 15.

1. Соотношения взаимности Онзагера для кинетических коэффициентов: $L_{ik}=L_{ki}$.
2. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанных и вынужденных переходов.

Билет № 16.

1. Системы с памятью. Принцип причинности. Динамическая восприимчивость.
2. Приближения Планка и Росселанда для кинетического уравнения лучистого переноса.

Билет № 17.

1. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига для динамической восприимчивости.
2. Излучение от полупространства и от слоя конечной толщины.

Билет № 18.

1. Законы Кирхгофа для излучения.
2. Термомеханические явления.

Билет № 19.

1. Теория термодинамической стабильности. Термодинамические неравенства.
2. Законы Кирхгофа для излучения.

Билет № 20.

1. Соотношения Онзагера. Термоэлектрические явления.
2. Законы Кирхгофа и закон Ламберта для излучения.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

Физический факультет

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____

1.
2.
3.

Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/
(подпись)

« _____ » _____ 20 ____ г.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Неравновесная термодинамика и законы излучения»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного