

**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 нанокompозитных материалов**



академик РАН

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ

А. Е. Бондарь

2020 г.

Рабочая программа дисциплины

ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

направление подготовки: **03.04.02 Физика, Курс 2, семестр 3**
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
3	72	16	16		38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётных единицы, из них: - контактная работа 34 часов - в интерактивных формах 16 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Разработчик:
к.ф.-м.н., доцент


Д.Ю. Дубов

Зам.зав. КафНКМ ФФ НГУ
д.х.н., доцент


А.А. Хасин

Руководитель программы
д.ф.-м.н.


И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2020

Содержание	
Аннотация	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	4
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
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.	5
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	12
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	12
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	13
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	13
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	13
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	14

Аннотация
к рабочей программе дисциплины «Физика процессов тепло- и массообмена»
Направление: **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Программа курса «Физика процессов тепло- и массообмена» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню подготовки магистрантов по направлению **03.04.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Новосибирский государственный университет (НГУ) межфакультетской кафедрой нанокompозитных материалов в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами второго курса магистратуры в третьем семестре.

Цели курса – дать целостное представление о кинетике и механизмах процессов, связанных с переносом энергии и вещества на атомно-молекулярном и наноуровнях. Это процессы, лежащие в основе макроскопических явлений тепло- и массообмена и имеющие особое значение при исследовании указанных явлений в наноструктурированных средах. Курс призван научить студентов анализировать роль различных носителей энергии (электронов, частиц флюидов, фононов и фотонов) и особенности процессов с их участием при атомных масштабах, решать задачи физики процессов переноса вещества и энергии в наносистемах, сформировать навыки исследователя фундаментальных проблем нанотехнологий.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося **профессиональных компетенций (ПК):**

ПК-1 - способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;

ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **знать** основные характеристики главных переносчиков энергии и свойствах, проявляемых этими переносчиками в процессах накопления, переноса и преобразования энергии на наноуровне; понимать кинетику и механизмы транспортных процессов;

- **уметь** предсказывать и объяснять особенности теплофизических свойств нанокompозитных материалов различного типа;

- **владеть** представлениями об особенностях теплофизических процессов в микро- и наносистемах, связанных с изменением пространственно-временных масштабов, классическими и квантовыми размерными эффектами.

Курс рассчитан на один семестр. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа магистранта и её контроль преподавателями с помощью заданий, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: решение задач на практических занятиях, контрольные работы, задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72 часа / 2** зачетные единицы.

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

Курс «Физика процессов тепло- и массообмена» предназначен для приобретения магистрантами современных о фундаментальных физических процессах на микроуровне, лежащих в основе макроскопических процессов переноса энергии и вещества, о свойствах, проявляемых в этих процессах основными носителями энергии (электронами, фотонами, фононами и частицами флюидов), об общих характеристиках и особенностях переноса энергии и вещества носителями каждого типа.

Для достижения этой цели выделяются задачи курса:

- обобщение сведений из предыдущих курсов (классической термодинамики и статистики, классической теории тепло- и массообмена, квантовой механики и теории строения вещества), необходимых для анализа физических основ процессов переноса на микро- и наноуровнях;
- освоение общего подхода к описанию переноса и трансформации энергии носителями разного типа;
- применение данного подхода к описанию кинетики накопления, переноса и преобразования энергии основными типами носителей (электронами, фотонами, фононами, частицами флюидов), получение представления об особенностях процессов переноса каждого типа носителей;
- обучение навыкам практического применения полученных теоретических знаний в решении задач, связанных с процессами переноса в нанокompозитных материалах, корректного анализа и понимания современных экспериментальных результатов в данной области.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося **профессиональных компетенций (ПК)**:

ПК-1 - способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;

ПК 1.1 - **знать** основные характеристики главных переносчиков энергии и свойствах, проявляемых этими переносчиками в процессах накопления, переноса и преобразования энергии на наноуровне; понимать кинетику и механизмы транспортных процессов;

ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.

ПК 2.2 - **уметь** предсказывать и объяснять особенности теплофизических свойств нанокompозитных материалов различного типа;

ПК 2.3 - **владеть** представлениями об особенностях теплофизических процессов в микро- и наносистемах, связанных с изменением пространственно-временных масштабов, классическими и квантовыми размерными эффектами.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Курс «Физика процессов тепло- и массообмена» читается в третьем семестре (2 курс) для магистрантов, обучающихся на кафедре нанокompозитных материалов, и является одной из дисциплин по выбору по направлению подготовки 03.04.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика». Дисциплина «Физика процессов тепло- и массообмена» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата. Дисциплина должна предшествовать выполнению магистерской диссертации т.к. дает магистранту необходимые знания и навыки для выполнения на современном уровне представлений о фундаментальных физических процессах на микроуровне, лежащих в основе макроскопических процессов переноса энергии и вещества, о свойствах, проявляемых в этих процессах основными носителями энергии (электронами, фотонами, фононами и частицами

флюидов), об общих характеристиках и особенностях переноса энергии и вещества носителями каждого типа.

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
3	72	16	16		38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётных единицы, из них: - контактная работа 34 часа - в интерактивных формах 16 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, самостоятельная работа магистранта и её контроль преподавателями с помощью заданий, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: контрольные вопросы на знание материала предыдущей лекции, домашние задания, контрольные работы, задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче дифференцированного зачета и дифференцированный зачет) – 2 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, дифференцированный зачет) составляет 34 часа.

Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 16 часов.

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

Дисциплина «Физика процессов тепло- и массообмена» представляет собой полугодовой курс, читаемый в магистратуре физического факультета НГУ в осеннем семестре 2 курса. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)					Консультации перед диф.зачетом (часов)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Классическая теория теплопередачи. Физика теплообмена на атомном уровне. Характеристика основных носителей	1	4	1	1	3			
2	Квантовая механика атомно-молекулярных систем. Молекулярные ансамбли, температура и термодинамические соотношения	2	4	1	1	3			
3	Общая теория переноса и трансформации энергии. Кинетическое уравнение Больцмана	3	4	1	1	3			
4	Кинетика и вероятности энергетических переходов, золотое правило Ферми. Уравнения	4	4	1	1	3			

	Максвелла и электромагнитные волны.								
5.	Симметрия кинетических коэффициентов. Стохастическая динамика, флуктуации и диссипация. Макроскопические уравнения гидрогазодинамики и теории упругости	5	4	1	1	3			
6.	Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии фононами	6-7	4	2	1	3			
7	Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии электронами	8-9	4	2	1	3			
8	Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии атомами и молекулами	10-11	5	2	2	3			
9	Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии фотонами	12	5	2	2	3			
10	Наночастицы в газовой фазе. Эмиссия электронов и фотонов наночастицами	13	4	1	2	3			
11	Мономолекулярные процессы. Испарительный ансамбль.	14	4	1	2	3			
12	Микроскопические модели	15	4	1	1	3			

	нуклеации и конденсации. Плавление, отвердевание, наночастиц. Уравнение Смолуховского								
13	Подготовка к дифференцированному зачету		2			2			
14	Дифференцированный зачет	17	2						2
Всего			72	16	16	38			2

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

Модуль 1.

I. Классическая теория теплопередачи. Физика теплообмена на атомном уровне. Характеристика основных носителей.

1. Процессы переноса в классической теплофизике. Средняя длина свободного пробега в газах и теплопроводность. Перенос тепла в твердых диэлектриках, фононная теплопроводность. Перенос тепла в металлах. Обобщение явлений переноса: кинетическое уравнение Больцмана. Уравнение Больцмана и макроскопические переменные. Теплопроводность. Уравнение Фурье. Феноменологическое описание радиационного переноса тепла. Рассеяние в диффузной среде. Уравнения гидродинамики вязкой жидкости. Уравнение конвективного переноса тепла.

2. Теплопередача на атомном уровне. Основные переносчики энергии: фононы, электроны, молекулы (флюида), фотоны. Равновесные и неравновесные распределения по энергии. Неравновесность энергетического распределения при преобразовании энергии. Процессы переноса, связанные с неравновесностью. Физика теплообмена на атомном уровне: накопление, перенос и преобразование тепловой энергии. Временные и пространственные масштабные факторы. Классические и квантовые размерные эффекты. Роль объема и поверхности в процессах переноса.

II. Квантовая механика атомно-молекулярных систем. Молекулярные ансамбли, температура и термодинамические соотношения.

1. Межатомные и межмолекулярные потенциалы. Молекулярные орбитали. Межатомные силы и потенциалы. Кинетическая и потенциальная энергии. Атомные и молекулярные электронные орбитали. Ab initio расчеты, модельные потенциалы. Характерные атомные длины связей и энергии. Уравнение Шрёдингера и квантовые энергетические состояния.

2. Молекулярные ансамбли, температура, термодинамические соотношения. Виды молекулярных ансамблей. Равнораспределение по энергии. Вероятности и статистические суммы. Эргодическая гипотеза. Основные переносчики энергии: фононы, электроны, молекулы (флюида), фотоны. Равновесные и неравновесные распределения по энергии. Неравновесность энергетического распределения при преобразовании энергии. Явления переноса, связанные с неравновесностью.

Модуль 2.

III. Общая теория переноса и трансформации энергии. Кинетическое уравнение Больцмана.

1. Общие методы кинетики переноса тепла в различных приближениях. Механизмы переноса тепла, характерные масштабы и режимы переноса. Формализм Ландауэра.

2. Кинетическое уравнение Больцмана. Функция распределения частиц. Вывод уравнения Больцмана. Столкновительный член. Приближение времени релаксации и транспортные свойства. Моменты в уравнении Больцмана. Численное решение уравнения: методы Монте-Карло, решение на решетке.

IV. Кинетика и вероятности энергетических переходов, золотое правило Ферми. Уравнения Максвелла и электромагнитные волны.

1. Кинетика энергетических переходов и золотое правило Ферми. Упругое и неупругое рассеяние. Вероятности переходов при взаимодействии фононов, при взаимодействии электронов (дырок), при взаимодействии молекул флюида, при взаимодействии фотонов.

2. Уравнения Максвелла и электромагнитные волны. Уравнения Максвелла. Уравнение распространения электромагнитной волны. Энергия электромагнитной волны, энергия фотона. Электрический диполь. Испускание, поглощение и рассеяние ЭМ волны. Диэлектрическая функция и диэлектрический нагрев. Электрическое сопротивление и подвижность, джоулевый нагрев.

V. Симметрия кинетических коэффициентов. Стохастическая динамика, флуктуации и диссипация. Макроскопические уравнения гидродинамики и теории упругости. Симметрия кинетических коэффициентов. Теорема Онзагера. Стохастическая динамика и перенос частиц. Уравнение Ланжевена и броуновское движение. Уравнение Фоккера-Планка. Теория среднего поля.

Равновесные флуктуации и диссипация. Теория переноса Грина-Кубо. Переход к макроскопическому описанию тепломассопереноса. Макроскопические уравнения динамики жидкости и газа. Макроскопические уравнения теории упругости. Макроскопические масштабы.

Модуль 3.

VI. Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии фононами.

1. Плотность состояний и дисперсия фононов. Модель Дебая. Зона Бриллюэна. Дисперсия и плотность состояний фононов в одномерной решетке. Модель Дебая для плотности состояний фононов. Другие модели. Обратная решетка. Зона Бриллюэна. Примитивная решетка и ее базис: количество фононных ветвей.

2. Колебания решетки. Нормальные моды и динамическая матрица. Квантовая теория колебаний решетки. Удельная теплоемкость фононов и дебаевская средняя скорость звука. Смещения атомов при колебаниях решетки.

3. Уравнение Больцмана для фононов. Одномодовое время релаксации. Модели проводимости фононов: Каллауэя, Каллауэя-Холланда. Модели времени релаксации при столкновении фононов. Сравнение моделей дисперсии фононов и прогнозирование теплопроводности решетки.

4. Фононная проводимость. Разложение фононной проводимости: акустические фононы, оптические фононы. Экспериментальные данные о фононной проводимости. Граничное сопротивление. Поглощение ультразвука в твердых телах.

5. Размерные эффекты. Влияние размера на проводимость фононов. Фононная проводимость сверхрешетки. Плотность фононных состояний в наночастицах. Проводимость в анизотропных системах.

VII. Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии электронами.

1. Электронная зонная структура в ионной решетке. Зонная структура в периодическом потенциале из уравнения Шрёдингера. Зонная структура в одномерной ионной решетке. Трехмерные зоны в приближении жесткой связи. Зонная структура для электронов в полупроводниках и

эффективная масса. Модель периодического электронного газа для металлов. Плотность носителей (электронов/дырок) и состояний в полупроводниках. Удельная теплоемкость электронов проводимости.

2. Уравнение Больцмана для электронов в полупроводниках. Термоэлектрические эффекты. Время релаксации электронов и золотое правило Ферми. Термоэлектрические транспортные коэффициенты. Коэффициенты Зеебека, Пельтье и Томсона. Электро- и теплопроводность. Длина пробега электрона в металле. Магнитное поле и коэффициент Холла.

3. Взаимодействие между электронами и фононами. Электрон-фононные времена релаксации в полупроводниках: столкновение акустических фотонов с электронами, столкновения оптических фотонов с электронами. Перенос электронов и фононов при локальной тепловой неравновесности. Уравнения для энергии мод фононов. Длина охлаждения при электрон-фононной локальной неравновесности.

VIII. Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии молекулами флюида.

1. Энергетические состояния и статистические суммы. Энергия и статсумма: поступательные, колебательные, вращательные, электронные. Ab initio расчеты колебательных и вращательных состояний. Теплоемкость идеального газа. Теплоемкость плотного флюида (модель Ван-дер-Ваальса).

2. Кинетическое уравнение Больцмана для газа. Столкновения между частицами. Равновесная функция распределения для поступательного движения. Учет гравитационной потенциальной энергии. Частота парных столкновений в идеальном газе и время релаксации. Средняя длина свободного пробега и вязкость газа. Коэффициент теплоотдачи при испарении/конденсации частиц в кинетическом пределе. Теплопроводность идеального газа из уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Теплопроводность жидкости из средней длины пробега, динамика движения молекул. Ланжевенский вывод броуновской диффузии. Эффективная теплопроводность флюида с диспергированными частицами.

3. Взаимодействие частиц движущегося флюида с поверхностью. Режимы течения флюида. Коэффициенты аккомодации и скольжения при кнудсеновском режиме течения. Коэффициенты скольжения при переходном режиме течения. Термофорез твердых частиц в газах. Физическая адсорбция и десорбция. Расклинивающее давление в тонких пленках жидкости.

4. Структура турбулентного течения и перенос в пограничном слое. Спектр турбулентных кинетических энергий при однородной турбулентности. Тепловой поток в турбулентном пограничном слое. Длина турбулентного смешения и турбулентная теплопроводность. Пространственное изменение длины турбулентного смешения в пограничном слое. Уравнение Ланжевена для турбулентного смешения.

5. Теплопроводность термической плазмы. Плотность свободных электронов и теплопроводность плазмы. Уравнение энергии для термически неравновесной плазмы. Концентрации компонентов в двухтемпературной плазме. Кинетика обмена энергией между электронами и тяжелыми компонентами.

6. Размерные эффекты. Эффективная теплопроводность в газонаполненных узких зазорах. Эффект теплового скольжения («крипа») в узких зазорах.

Программа практических занятий (16 часов)

IX. Кинетика накопления, переноса и преобразования энергии фотонами.

1. Фотонный газ и излучение черного тела. Квантово-механическое описание фотонного газа. Лазеры и излучение в узкой полосе частот. Классическое электромагнитное тепловое излучение в ближнем поле.

2. Взаимодействие фотонов с веществом: квантово-механическое и полуклассическое описание. Гамильтонианы поля излучения. Взаимодействие фотонов с веществом. механическое описание фотонного газа. Поглощение и излучение фотонов в двухуровневых электронных системах: уравнение Эйнштейна для вероятности заселения возбужденного состояния, коэффициенты Эйнштейна для равновесной электронной заселенности, спонтанное и стимулированное излучение в равновесной нагретой полости, спектральный коэффициент и сечение поглощения и излучение в узкой полосе частот.

3. Описание радиационного теплопереноса на языке частиц и на языке волн. Уравнение Больцмана для фотонов с поглощением, излучением, и рассеянием. Объединение поглощения и испускания излучения. Интенсивность фотонов: уравнение переноса тепла. Предел оптической толщины, средняя длина свободного пробега и радиационная теплопроводность. Описание волнами. Усиление поля и локализация фотонов. Усиление когерентности и электрического поля. Сравнение с описанием частицами.

4. Поглощение и испускание фотонов. Коэффициент поглощения в твердых телах. Коэффициент поглощения в газах. Механизмы испускания. Взаимосвязь поглощения и излучения (Закон Кирхгофа). Спектр излучения с поверхности. Излучательные и безызлучательные распады и квантовая эффективность.

5. Фотоэлектрические солнечные элементы: снижение эмиссии фононов. Эффективность идеальной однозонной солнечной фотоэлектрической системы. Эффективность идеальной солнечной ФЭ системы с несколькими зонами. Полуэмпирическая эффективность солнечной ФЭ системы.

6. Размерные эффекты. Усиление радиационной теплопередачи в ближнем поле. Ограничение энергии фотонов при помощи оптической микроскопии ближнего поля. Утилизация горячих фононов в фотонике.

Модуль 4.

X. Наночастицы в газовой фазе. Эмиссия электронов и фотонов наночастицами. Эмиссия электронов. Эмиссия фотонов. Эмиссия фотонов металлической частицей, плазмонный резонанс. Кинетическая энергия эмитируемой частицы в мономолекулярных процессах.

XI. Мономолекулярные процессы. Испарительный ансамбль. Испарение из изолированных частиц. Испарение в пределе больших частиц. Кинетика метастабильного распада частиц.

XII. Микроскопические модели нуклеации и конденсации. Плавление, отвердевание наночастиц. Уравнение Смолуховского. Свободная энергия малой частицы. Свойства критического зародыша. Жидкокапельная модель нуклеации. Конденсация как полимеризация. Химические модели. Конденсация на ионах. Эффект поверхностного плавления. Критерии плавления и отвердевания: измерение теплоемкости, индекс Линдемана. Уравнение Смолуховского.

Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	12
Подготовка к контрольным работам	12

Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	12
Подготовка к диф.зачету	2

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература

1. Гольдин, Лев Лазаревич. Введение в квантовую физику : учебное руководство / Л.Л. Гольдин, Г.И. Новикова. Москва : Наука, 1988. 327 с. : ил.
2. Крайнов, Владимир Павлович. Качественные методы в физической кинетике и гидрогазодинамике : [учебное пособие для физических специальностей вузов] / В. П. Крайнов. Москва : Высшая школа, 1989. 223, [1] с. : ил. ; 21 см. ISBN 5-06-000464-3

5.2. Дополнительная литература

1. Смирнова, Наталия Александровна. Методы статистической термодинамики в физической химии : учебное пособие для студентов химических специальностей высших учебных заведений / Н.А. Смирнова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 1982. 456 с. : ил. ; 22 см.
2. Харрис, Питер. Углеродные нанотрубки : синтез, свойства и применение / Питер Харрис; пер. с англ. под ред. Двуреченского А.В. ; пер.: Ефимов В.М. ; [Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова]. - Новосибирск : Офсет-ТМ, 2016. - 219, [1] с. : ил. ; 25 см. - ISBN 978-5-85957-133-8
3. Иродов, Игорь Евгеньевич. Физика макросистем. Основные законы : учебное пособие : [для студентов физических специальностей вузов] / И.Е. Иродов. - 7-е изд. - Москва : Лаборатория знаний, 2019. - 207 с. : ил. ; 22 см. - (Технический университет, Общая физика). ISBN 978-5-00101-113-2

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Дмитриев, Александр Сергеевич. Введение в нанотеплофизику / А.С. Дмитриев. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 790 с. : ил., табл. ; 24 см. (Нанотехнологии) .
2. Смирнова, Наталия Александровна. Методы статистической термодинамики в физической химии : учебное пособие для студентов химических специальностей высших учебных заведений / Н.А. Смирнова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 1982. 456 с. : ил. ; 22 см.
3. Харрис, Питер. Углеродные нанотрубки : синтез, свойства и применение / Питер Харрис; пер. с англ. под ред. Двуреченского А.В. ; пер.: Ефимов В.М. ; [Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова]. - Новосибирск : Офсет-ТМ, 2016. - 219, [1] с. : ил. ; 25 см. - ISBN 978-5-85957-133-8
4. Иродов, Игорь Евгеньевич. Физика макросистем. Основные законы : учебное пособие : [для студентов физических специальностей вузов] / И.Е. Иродов. - 7-е изд. - Москва : Лаборатория знаний, 2019. - 207 с. : ил. ; 22 см. - (Технический университет, Общая физика). ISBN 978-5-00101-113-2.
5. Волокитин, Александр Иванович. Тепловое излучение на наноуровне. Теория и приложения / А.И. Волокитин. Самара : Сам. ун-т, 2008. 239 с. : ил. ; 22 см. ISBN 978-5-86465-398-2

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 используются аудитории, оборудованные всем необходимым для чтения лекций (доска, экран, компьютер, мультимедийный проектор), в том числе 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 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.

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 проведения опросов на знание материала предыдущих лекций, оценки активности студентов в решении задач на практических занятиях, приема заданий для самостоятельной работы студентов, проведения контрольной работы. Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в виде дифференцированного зачета.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачете. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенций ПК-1 и ПК-2.

Оценка успеваемости магистранта при прохождении дисциплины «Физика процессов тепло- и массообмена» проводится путем 10-минутного теоретического опроса на знание материала предыдущей лекции, активности участия в решении задач на практических занятиях, сдачи семестровых заданий для самостоятельного решения и написания контрольной работы. В зависимости от результатов работы в течение семестра магистрант имеет право на получение оценки на основании балльно-рейтинговой системы. Для этого он должен:

- в ходе прохождения дисциплины посетить не менее 50 % занятий;
- написать на положительную оценку контрольную работу;
- набрать не менее 60 баллов по результатам контрольной работы, активности на практических занятиях и сдачи семестровых заданий.

Оценка-«автомат» выводится как средневзвешенная из полученных магистрантом баллов по результатам работы в семестре. Баллы складываются из оценок за блиц-тесты и контрольные работы (с весами 1 и 5 соответственно) и бонусов за активность на практических занятиях (полбалла). Максимальная сумма баллов – 100 и более (за счет бонусов); «отлично», «хорошо» и «удовлетворительно» соответствуют суммам 90, 80 и 60.

Итоговую оценку за курс обучающийся может получить на дифференцированном зачете в конце семестра, где он имеет возможность либо повысить оценку, полученную им «автоматом», либо получить любую положительную (или неудовлетворительную) оценку в случае отсутствия у него «оценки-автомата» по результатам работы в семестре.

Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физика процессов тепло- и массообмена».

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.	Минимально допустимый уровень знаний. 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 2.2	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 2.3	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.

10.2. Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Список задач для решения на практических занятиях:

1. Два куска меди массой по 10 г имеют начальные температуры 350 и 290 К и вступают в тепловой контакт. Определить передаваемую энергию ($c = 0.39$ Дж/(г·К)) и увеличение энтропии системы при передаче 1 % энергии.
2. Для двухуровневой системы с разностью энергий ϵ , находящейся при температуре T , определить равновесную энергию, теплоемкость и энтропию.
3. Дана одномерная цепочка одинаковых атомов, постоянная решетки $a = 0,3$ нм, скорость звука $2 \cdot 10^5$ см/с. Определить отношение плотностей (на единичный интервал волнового вектора Δk) для фононов с максимальным квазиимпульсом ($p_{\max} = \pi \hbar / a$) и с квазиимпульсом $p_{\max}/2$ при температуре 300 К. То же самое при температуре 10 К.
4. В предположении, что функция Дебая с характеристической температурой, равной 280 К, дает точное значение теплоемкости кристаллического хлористого натрия, вычислить его энтропию при 10, 25 и 50 К.
5. Определить температурную зависимость теплопроводности диэлектрика, определяемой рассеянием акустических фононов на примесных центрах.
6. Определить соотношение электронной и решеточной (ионной) теплоемкостей в металле при комнатной температуре.
7. В рамках модели Дебая определить максимальные значения энергии и импульса фонона в меди (дебаевская температура 330 К, плотность меди 8,9 г/см³).
8. Из условий предыдущей задачи определить давление фононного газа в меди.

9. Найти давление газа электронов, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака. Вычислить величину давления для случая меди.
10. Оценить длину свободного пробега электрона в меди ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, $a = 0,36$ нм, ГЦК решетка) при комнатной температуре.
11. Металлический натрий формирует объемцентрированную кубическую решетку, расстояние между ближайшими атомами $0,37$ нм. Определить среднюю кинетическую энергию электронного газа.
12. Теплоемкость калия при низких температурах аппроксимируется зависимостью $c_v/T = 2.08 + 2.57T^2$; здесь c_v/T в мДж/(моль·К²), T в Кельвинах. Плотность калия $0,862$ г/см³, атомная масса 39 г/моль. Определить отсюда а) энергию Ферми; б) температуру Дебая (считать, что все три акустические ветви имеют одинаковую групповую скорость).
13. Оценить сечение рассеяния электрона на атоме Ni в сплаве Ag + 1% Ni, если его удельное сопротивление при 0 К составляет $\rho \approx 10^{-6}$ Ом·см. Серебро имеет ГЦК решетку с $a = 0.41$ nm.
14. Для одновалентного металла с простой кубической решеткой определить максимальный угол отклонения электрона при поглощении/испускании фонона. Использовать модель Дебая и приближение свободных электронов.
15. Получить соотношение между показателем RRR (residual-resistivity ratio) и концентрацией примесей в проводнике.
16. Для системы, в которой длина пробега электрона и фонона ограничена одним и тем же характерным размером L (например, диаметром тонкой проволоки), оценить температуру, при которой электронная теплопроводность сравнивается с фононной (решеточной).
17. Полупроводник InSb обладает диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 16$ и эффективной массой электрона $m^* \approx 0.013 m_e$. На основании формул для атома водорода получить энергию связи электрона с примесным донорным центром и «боровский радиус» такой системы.
18. Константы Ван-дер-Ваальса для углекислого газа: $a = 0,367$ Па*м⁶/моль², $b = 4,3 \cdot 10^{-5}$ м³/моль. Определить для газа с температурой 300 К, при каком давлении его плотность окажется равной $0,5$ кг/л. Сравнить с давлением, рассчитанным по формуле состояния идеального газа.
19. Из условий предыдущей задачи определить для CO₂ разность молярных теплоемкостей C_p и C_v .
20. Найти число атомов в молекуле газа, у которого при «замораживании» колебательных степеней свободы постоянная адиабаты γ увеличивается в $1,2$ раза.
21. Для воздуха при нормальных условиях сопоставить характерные величины, имеющие размерность длины: длину свободного пробега, среднее расстояние между частицами, диаметр молекулы, среднюю де-бройлевскую длину волны молекулы.
22. Оценить коэффициенты самодиффузии и вязкости в воздухе при нормальных условиях.
23. При малых температурах кинетическая энергия молекул падает настолько, что становится существенным их ван-дер-ваальсовское притяжение. Определить, как при его учете сечение столкновения молекул зависит от их относительной скорости, а коэффициент теплопроводности – от температуры газа.
24. Определить коэффициент температурного скачка в разреженном газе в приближении полной тепловой аккомодации сталкивающихся со стенкой молекул.
25. Вычислить тепловую энергию одномерного газа фотонов в полости длиной L .
26. Спектральная излучательная способность малой частицы с диаметром d , много меньшим длины волны λ , равна $\epsilon(\lambda) = d/\lambda$. Определить для нее температурную зависимости полной интенсивности излучения (аналог закона Стефана-Больцмана).
27. Солнечный свет проходит через фильтр с узкой полосой пропускания $\Delta\nu$ и попадает в полость, где конвертируется в равновесное излучение черного тела. Вычислить температуру последнего, если солнечный свет имеет радиационную температуру 5800 К, а фильтр выделяет излучение между 490 и 500 нм. Во сколько раз при этом увеличивается энтропия излучения?

28. Считая серебро одновалентным металлом со сферической поверхностью Ферми и характеристиками: плотность 10.5 г/см^3 ; ГЦК решетка, атомный вес $A = 107.87$, удельное сопротивление $\rho = 1.61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 295 К и $0.0038 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 20 К , температура Дебая = 220 К , вычислить следующие величины:
- энергию Ферми и температуру Ферми;
 - радиус k_F сферы Ферми в k -пространстве;
 - скорость Ферми;
 - площадь поперечного сечения поверхности Ферми;
 - среднюю длину свободного пробега электронов при комнатной температуре и вблизи абсолютного нуля температур;
 - длину ребра кубической элементарной ячейки;
 - длину векторов обратной решетки первых двух координационных сфер в k -пространстве;
 - объем первой зоны Бриллюэна.
 - среднюю эффективную массу акустического фонона при $T \gg T_{\text{Дебая}}$ и при 20 К .
 - максимальные значения энергии и импульса фонона (в рамках модели Дебая).
 - давление фононного газа.

Вариант контрольной работы №1

- Поведение теплоемкости фононного и электронного газов в пределе низких температур;
- Механизмы диффузии легкого газа и тяжелого газа в легком;
- Режимы течения газа в зависимости от значений чисел Рейнольдса и Кнудсена;
- Температурная зависимость теплопроводности диэлектрика, связанной с рассеянием акустических фононов на примесных центрах;
- Условия невырожденности и идеальности термодинамической системы;

Примерный перечень задач семестровых заданий для самостоятельного решения:

Задача 1. На плоской бесконечной (в двух измерениях) поверхности находится слой атомов с парным межатомным потенциалом $U \sim r^{-n}$. Определить форму потенциала, создаваемого слоем, в предельных случаях малой и большой толщины.

Задача 2. Оценить размер и площадь поверхности сферической частицы, содержащей N атомов меди. Плотность меди $8,9 \text{ г/см}^3$. Определить, насколько увеличится радиус частицы при добавлении на ее поверхность монослоя атомов.

Задача 3. Объяснить, почему двухатомная молекула имеет только две степени свободы. Или все-таки три?

Задача 4. В рамках жидкокапельной модели найти при $T = 0$ различие суммы энергий двух частиц, содержащих по $N/2$ мономеров, и энергии частицы из N мономеров. Сравнить это различие с объемным вкладом для частиц при $N = 10^{24}$, 10^{10} и 10^3 .

Задача 5. Для воздуха при нормальных условиях сопоставить характерные величины, имеющие размерность длины: длину свободного пробега, среднее расстояние между частицами, диаметр молекулы, среднюю де-бройлевскую длину волны молекулы.

Задача 6. Оценить коэффициенты самодиффузии и вязкости в воздухе при нормальных условиях.

Задача 7. При малых температурах кинетическая энергия молекул падает настолько, что становится существенным их ван-дер-ваальсовское притяжение. Определить, как при его учете сечение столкновения молекул зависит от их относительной скорости, а коэффициент теплопроводности – от температуры газа.

Задача 8. Определить силу, действующую из-за эффекта термофореза на Al_2O_3 частицу диаметром 100 нм в воздухе при температуре 800 К и температурном градиенте 500 К/мм.

Задача 9. Определить коэффициент температурного скачка в разреженном газе в приближении полной тепловой аккомодации сталкивающихся со стенкой молекул.

Задача 10. Определить массовый расход разреженного газа через малое отверстие в тонкой стенке при диаметре отверстия, много меньшем длины свободного пробега.

Задача 11. Оценить кинематическую вязкость фононного газа при высоких (по сравнению с температурой Дебая) температурах.

Задача 12. Определить температурную зависимость теплопроводности диэлектрика, определяемой рассеянием акустических фононов на примесных центрах.

Задача 13. Найти, как связаны электропроводность и электронная часть теплопроводности в металле.

Задача 14. Найти соотношение между величинами электронной и фононной теплопроводности в чистых металлах.

Задача 15. Оценить вклад электрон-электронных столкновений в электрическое сопротивление металлов.

Задача 16. Константы Ван-дер-Ваальса для углекислого газа: $a = 0,367 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b = 4,3\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$. Определить для газа с температурой 300 К, при каком давлении его плотность окажется равной 0,5 кг/л. Сравнить с давлением, рассчитанным по формуле состояния идеального газа.

Задача 17. Из условий предыдущей задачи определить для CO_2 разность молярных теплоемкостей C_p и C_v .

Задача 18. Найти число атомов в молекуле газа, у которого при «замораживании» колебательных степеней свободы постоянная адиабаты γ увеличивается в 1,2 раза.

Задача 19. Идеальный газ одноатомных молекул занимает при температуре 300 К объем 1 мкм^3 . Насколько изменится статистический вес этой макросистемы при ее изохорическом нагреве на 1 К?

Задача 20. Определить фазовый объем (в единицах \hbar), доступный атому золота, находящемуся в объеме 1 мм^2 с кинетической энергией между 0,1 и 1 эВ.

Задача 21. Определить сечение рассеяния электромагнитной волны малой частоты в классическом приближении на малой частице (длина волны много больше диаметра частицы).

Задача 23. Спектральная излучательная способность малой частицы с диаметром d , много меньшим длины волны λ , равна $\epsilon(\lambda) = d/\lambda$. Определить для нее температурную зависимости полной интенсивности излучения (аналог закона Стефана-Больцмана).

Задача 24. Определить соотношение электронной и решеточной (ионной) теплоемкостей в металле.

Задача 25. Оценить давление электронного газа на стенки металла при $T = 0$ для типичной концентрации свободных электронов $\sim 2\cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Задача 26. Определить первый порядок поправки к низкотемпературной теплоемкости ($\sim T^3$) в модели Дебая.

Задача 27. В рамках модели Дебая определить максимальные значения энергии и импульса фонона в меди (дебаевская температура 330 К, плотность меди 8,9 г/см³).

Задача 28. Из условий предыдущей задачи определить давление фононного газа в меди.

Список теоретических вопросов, выносимых на дифференцированный зачет:

1. Уравнение теплового баланса.
2. Явления переноса. Их взаимосвязь и различие. Основные переносчики тепловой энергии
3. Системы в тепловом и диффузионном контакте. Температура, энтропия, химический потенциал. Обратимые и необратимые процессы.
4. Статистическая сумма и распределение Больцмана.
5. Распределения Ферми-Дирака, Бозе-Эйнштейна, Максвелла-Больцмана.
6. Три вида теплопередачи. Уравнение Фурье, закон Ньютона, закон Кирхгофа. Диффузионный и баллистические механизмы тепло- и массопередачи.
7. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации.
8. Кристаллы. 1D и 2D кристаллические системы. Элементарная ячейка. Обратная решетка, зоны Бриллюэна.
9. Колебания атомов в одномерной решетке атомов одного и двух сортов. Оптическая и акустическая ветви. Асимптотика колебаний. Скорость звука. Колебания в центре и на краю первой зоны Бриллюэна.
10. Число колебаний в 3D случае. Плотности состояний в реальном кристалле, в моделях Эйнштейна и Дебая.
11. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая.
12. Кристаллические структуры и тепловые колебания в углеродных наноструктурах (графен, УНТ).
13. Перенос тепла в нанотрубках. Формализм Ландауэра.
14. Статистика и термодинамика идеального Ферми-газа. Энергия, импульс, скорость Ферми.
15. Ферми-газ и его химический потенциал при конечной температуре. Механизм термо-ЭДС.
16. Энергия, давление и теплоемкость Ферми-газа. Электронная теплоемкость металлов.
17. Формирование энергетических зон электронной структуры в твердых телах (при сближении атомов и в периодическом потенциале).
18. Волны Блоха. Динамика электрона в кристаллах. Квазиимпульс и эффективная масса электрона.
19. Фононная теплопроводность твердых тел. Газовое приближение. Механизмы ограничения длины свободного пробега фонона.
20. Рассеяние фононов на неоднородностях и фононная теплопроводность при низких температурах.
21. Взаимодействие фононов. Теплопроводность при высоких температурах. Роль процессов переброса.
22. Электронная теплопроводность в модели свободных электронов. Рассеяние на неоднородностях и примесях. Рассеяние на фононах.
23. Электропроводность металлов. Модель Друде-Лоренца. Рассеяние электронов на примесях, фононах, электронах.
24. Связь электро- и теплопроводности металлов. Закон Видемана-Франца.
25. Поверхность Ферми в металлах. Формы и относительное расположение электронных и дырочных поверхностей Ферми.
26. Перенос электронов в одно- и двухслойном графене.
27. Перенос электронов в одностенных УНТ.
28. Классификация твердых тел на металлы, полуметаллы, полупроводники и диэлектрики. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Чистые и легированные полупроводники.

29. Электропроводность полупроводников в модели Друде-Лоренца. Экранирование кулоновского потенциала в металлах и полупроводниках. Экситоны.
30. Рассеяние проводящих электронов в полупроводниках на дефектах и фононах.
31. Теплопроводность полупроводников. Электронная теплопроводность. Закон Видемана-Франца.
32. Конвективный теплообмен в классической теплофизике. Основные положения. Уравнения конвективного теплообмена в дифференциальной форме.
33. Теория подобия. Основные числа подобия в конвективном теплообмене.
34. Течение через трубки и поры. Течение Пуазейля.
35. Ламинарный и турбулентный пограничный слой.
36. Энергетические свойства молекул как носителей тепла. Виды молекулярной энергии. Приближение Борна-Оппенгеймера. Степени свободы.
37. Термодинамика и теплоемкости идеального газа. Статистическая термодинамика плотного газа.
38. Основные положения кинетической теории газов.
39. Теплопроводность газов из кинетического уравнения Больцмана. Оценки теплопроводности жидкости.
40. Броуновское движение. Законы Эйнштейна.
41. Особенности теплопроводности наножидкостей. Возможные механизмы увеличения теплопроводности.
42. Режимы течения в разреженном газе, число Кнудсена. Взаимодействие частиц разреженного газа с поверхностью. Проскальзывание, аккомодация импульса и тепловой энергии в сильно разреженном и переходном режимах.
43. Размерные эффекты при теплообмене в разреженном газе.
44. Физическая адсорбция и десорбция. Модель Ленгмюра для однослойной адсорбции.
45. Теория конденсации. Нуклеация, рост частиц, коагуляция, коалесценция. Жидкокапельная модель. Кинетика нуклеации, модель Френкеля-Зельдовича.
46. Статистическая физика фотонного газа. Излучение черного тела. Равновесное и неравновесное излучение.
47. Радиационные процессы в двухуровневой системе. Коэффициенты Эйнштейна. Инверсная заселенность.
48. Взаимодействие излучения с веществом. Классическое и полуклассическое описание.
49. Радиационный перенос тепла в баллистическом и диффузионном режимах.
50. Примеры равновесных излучателей (реликтовое излучение, Солнце). Взаимодействие солнечного излучения с атмосферой Земли, поглощение и рассеяние. Тепловое излучение Земли и парниковый эффект.
51. Лазерное охлаждение газов и твердых тел. Примеры механизмов и способов охлаждения.
52. Механизмы поглощения излучения в объеме и на поверхности твердого тела. Тепловое излучение поверхности.
53. Диполи и дипольное излучение в ближнем и дальнем поле. Силы осцилляторов. Особенности радиационного теплопереноса в ближнем поле.
54. Тепловое излучение в наноструктурах в ближнем и дальнем поле. Радиационный теплообмен между наночастицами, между плоскими поверхностями с малым зазором.

Форма билета дифференцированного зачета представлен на рисунке

<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p> <p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</p> <p>Физический факультет</p>
<p>БИЛЕТ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ЗАЧЕТА № _____</p> <p>1. 2. 3.</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>«___» _____ 20 г.</p>

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 дисциплины
«Физика процессов тепло- и массообмена»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

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