

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 2

от 26.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА (ЧАСТЬ 1)**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.03.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
7	3	108	32	32	0	17	0	Э
Итого	3	108	32	32	0	17	0	

## АННОТАЦИЯ

В курсе изложены основы физики неравновесных явлений в молекулярных газах. Рассмотрены закономерности и механизмы явлений переноса в пространственно неоднородном разреженном газе и в смеси газов, а также неравновесные явления. Наряду с кинетикой газов рассмотрены вопросы кинетики конденсированного состояния, включая динамику фазовых переходов.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются ознакомление студентов с кинетической теорией неравновесных явлений в газах, изучение методов решения уравнения Больцмана, методов расчета процессов переноса в разреженных и плотных газах. ознакомление с кинетической теорией многофазных систем, теории переноса в металлах и диэлектриках, изучение методов решения уравнения Фоккера-Планка, изучение динамики фазовых переходов.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Кинетическая теория неравновесных явлений и процессов в газах занимает важное место в освоение практических методик расчета прикладных задач, возникающих в научно исследовательской и инженерно – внедренческой работе. Наряду со знаниями основ теории, бакалавры получают практические навыки решения уравнения Больцмана и получения из него уравнений, определяющих течения разреженных и плотных газов в различных условиях.

Кинетическая теория многофазных систем занимает важное место в освоение практических методик расчета прикладных задач, возникающих в научно исследовательской и инженерно – внедренческой работе.

Наряду со знаниями основ теории, студенты получают практические навыки решения уравнения Фоккера-Планка, расчета коэффициентов переноса в металлах и диэлектриках.

Уровень сложности теоретических и практических заданий полностью соответствует требованиям государственного образовательного стандарта.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
--	---------------------------	---	---

		опыта)	
научно-исследовательский			
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации	Природные и социальные явления и процессы	ПК-2 [1] - Способен выбирать и применять необходимое оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.044	3-ПК-2[1] - Знать современное оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области. ; У-ПК-2[1] - Уметь критически оценивать, выбирать оборудования, инструментов и методов исследований в избранной предметной области ; В-ПК-2[1] - Владеть навыками выбора и применения оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области.
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации	Природные и социальные явления и процессы	ПК-3.1 [1] - Способен применять физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011, 40.044, 40.104	3-ПК-3.1[1] - Знать физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений; У-ПК-3.1[1] - Уметь применять физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений; В-ПК-3.1[1] - Владеть аналитическими методами, методами обработки экспериментальных данных в области

			физики кинетических явлений
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации	Природные и социальные явления и процессы	ПК-3.2 [1] - Способен применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011, 40.044, 40.104	3-ПК-3.2[1] - Знать методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений; У-ПК-3.2[1] - Уметь применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений; В-ПК-3.2[1] - Владеть методами математической и теоретической физики, методами математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и

		<p>внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.</p>
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств

		<p>студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</li> </ul>
<p>Профессиональное воспитание</p>	<p>Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)</p>	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального</p>

		модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.
--	--	---

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>7 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	16/16/0		25	Зд-8	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, 3-ПК-3.2, У-

							ПК-3.2, В-ПК-3.2
2	Раздел 2	9-16	16/16/0		25	БДЗ-16	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, 3-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/32/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, 3-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2

\* – сокращенное наименование формы контроля



\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
БДЗ	Большое домашнее задание
Зд	Задание (задача)
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	32	32	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	16	16	0
1	<b>Неравновесные явления</b> Неравновесные явления. Пространственные и временные неоднородности макропараметров. Связь микро- и макропроцессов. Иерархия характерных времен и характерных геометрических масштабов процессов.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Движение системы N классических частиц</b> Движение системы N классических частиц. Условие применимости квазиклассического описания. n-частичные функции распределения. Операторы макровеличин. Газовый параметр. Определение макровеличин через одноступенчатую функцию распределения. Кинетическое уравнение и уравнение гидродинамики.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Одночастичная функция распределения разреженного газа</b> Одночастичная функция распределения разреженного газа с внутренними степенями свободы. Баланс частиц в микроскопически малом объеме. Уравнение Больцмана. Столкновительный интеграл. Область применимости уравнения Больцмана.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Свойства симметрии вероятности парных столкновений молекул</b> Свойства симметрии вероятности парных столкновений молекул и столкновительного интеграла. Равновесное состояние газа. Распределения Максвелла. Локальное равновесие.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Энтропия неравновесного газа.</b> Энтропия неравновесного газа. Уравнение переноса энтропии. Производство энтропии и поток энтропии. H-теорема.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Уравнения переноса массы, импульса и энергии.</b> Уравнения переноса массы, импульса и энергии. t-приближение для столкновительного интеграла в уравнении Больцмана. Оценка времени релаксации.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

7	<b>Граничные условия для уравнения Больцмана.</b> Граничные условия для уравнения Больцмана. Вероятность столкновений молекул с поверхностью твердого тела, свойства вероятности столкновений. Зеркально-диффузионная модель граничного условия для функции распределения.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Этапы эволюции неравновесного газа.</b> Этапы эволюции неравновесного газа. Гидродинамический этап эволюции, малый параметр неравновесности. Метод Чепмена-Энскога. Линеаризованное кинетическое уравнение.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Раздел 2</b>	16	16	0
9	<b>Свойства линеаризованного оператора столкновений.</b> Свойства линеаризованного оператора столкновений. Время релаксации возмещения функции распределения. Обоснование t-приближения.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Перенос энергии в газе.</b> Перенос энергии в газе. Поток тепла, коэффициент теплопроводности. Время релаксации средней энергии молекул. Перенос импульса, тензор потока импульса, коэффициент вязкости. Вторая вязкость. Уравнения гидродинамики, область их применимости.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Метод Греда.</b> Метод Греда. Уравнения переноса потока импульса и потока энергии в t-приближении. Тринадцатимоментное приближение. Частотная зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Кинетические уравнения и уравнения переноса для двухкомпонентной смеси газов</b> Кинетические уравнения и уравнения переноса для двухкомпонентной смеси газов. Уравнение диффузии.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Диффузионный поток в движущемся и неподвижном газе.</b> Диффузионный поток в движущемся и неподвижном газе. Причины диффузии. Коэффициенты диффузии. Термодиффузия.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
14	<b>Бародиффузия, разделение газов в центробежном поле.</b> Бародиффузия, разделение газов в центробежном поле. Эффекты разделения в газодинамическом сопле.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Процессы переноса в разреженном газе.</b> Процессы переноса в разреженном газе. Число Кнудсена. Перенос энергии в сильно разреженном газе. Коэффициент аккомодации энергии. Поток тепла и эффективный коэффициент теплопроводности	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
16	<b>Движение разреженного газа в канале при произвольном числе Кнудсена.</b> Движение разреженного газа в канале при произвольном числе Кнудсена. Зависимость расхода газа от числа Кнудсена.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

#### ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 2	<b>Характерные параметры газов.</b> Характерные параметры газов. Моменты одночастичной функции распределения
3 - 5	<b>Локально-равновесная функция распределения.</b> Локально-равновесная функция распределения. Распределение Максвелла.
6 - 9	<b>Уравнение Больцмана.</b> Уравнение Больцмана. Столкновительный интеграл. Процессы релаксации в неравновесном газе.
10 - 13	<b>Уравнения переноса массы, импульса и энергии в неоднородном газе.</b> Уравнения переноса массы, импульса и энергии в неоднородном газе. Оценка коэффициентов переноса
14 - 16	<b>Зеркально-диффузная модель.</b> Зеркально-диффузная модель. Коэффициент аккомодации. Разреженный газ. Уравнения переноса и коэффициенты переноса для разреженных газов.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) а также, проведение занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-2	З-ПК-2	Э, Зд-8, БДЗ-16
	У-ПК-2	Э, Зд-8, БДЗ-16
	В-ПК-2	Э, Зд-8, БДЗ-16
ПК-3.1	З-ПК-3.1	Э, Зд-8, БДЗ-16
	У-ПК-3.1	Э, Зд-8, БДЗ-16
	В-ПК-3.1	Э, Зд-8, БДЗ-16
ПК-3.2	З-ПК-3.2	Э, Зд-8, БДЗ-16
	У-ПК-3.2	Э, Зд-8, БДЗ-16
	В-ПК-3.2	Э, Зд-8, БДЗ-16

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – <i>«отлично»</i>	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – <i>«хорошо»</i>	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – <i>«удовлетворительно»</i>	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 –	F	Оценка «неудовлетворительно»

	«неудовлетворительно»		выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.
--	-----------------------	--	--

## **8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Ч-49 Кинетика разреженного газа : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. ЭИ Б 43 Термодинамика в 2 ч. Часть 1 : учебник и практикум для вузов, Москва: Юрайт, 2022
3. ЭИ Б82 Физическая кинетика атомных процессов в наноструктурах : учебное пособие для вузов, В. Д. Борман, В. Н. Тронин, В. И. Троян, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
4. 539.1 Б82 Физическая кинетика атомных процессов в наноструктурах : учебное пособие для вузов, В. Д. Борман, В. Н. Тронин, В. И. Троян, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 Л22 Теоретическая физика Т.10 Физическая кинетика, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский, Москва: Физматлит, 2007

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Для успешного обучения по данной дисциплине студент должен знать: основные понятия общей, статистической физики и гидрогазодинамики, а также знать основы

математического, векторного и тензорного анализа. Курс разбит на 2 семестра по два раздела в каждом. Основные темы:

Уравнение Больцмана

Методы решения уравнения Больцмана

Течение и диффузия в газах

Явления переноса в сильно разреженных газах

Явления переноса в диэлектриках

Явления переноса в металлах

Случайные процессы. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка

Кинетика фазовых переходов.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Для успешного обучения по данной дисциплине студент должен знать: основные понятия общей, статистической физики и гидрогазодинамики, а также знать основы математического, векторного и тензорного анализа. Курс разбит на 2 семестра по два раздела в каждом. Основные темы:

Уравнение Больцмана

Методы решения уравнения Больцмана

Течение и диффузия в газах

Явления переноса в сильно разреженных газах

Явления переноса в диэлектриках

Явления переноса в металлах

Случайные процессы. Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка

Кинетика фазовых переходов.

Автор(ы):

Тронин Иван Владимирович, к.ф.-м.н.