

# Белорусский государственный университет

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и образовательным  
инновациям  О.И. Чуприс

«12» июня 2019 г.

Регистрационный № УД-7304 уч.

## ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 80 05 Физика

2019 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 80 05-2019, учебного плана №G31-062/уч., утвержденного 11.04.2019.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**А.С. Гаркун** – доцент кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета (протокол № 12 от 23.05.2019);

Научно-методическим Советом БГУ  
(протокол № 5 от 28.06.2019).

Заведующий кафедрой теоретической  
физики и астрофизики  
д. ф.-м. н., профессор



А.Н. Фурс



## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

**Цель** учебной дисциплины – способствовать формированию у студентов магистратуры представлений о взаимосвязи макроскопических явлений переноса массы, импульса и энергии с микроскопическими процессами взаимодействия между атомами и молекулами в статистически неравновесных системах; пониманию разнообразных динамических эффектов в сплошных средах и навыков их теоретического анализа.

### **Задачи учебной дисциплины:**

- Изучение основных методов неравновесной термодинамики, кинетики неравновесных систем, теории флуктуаций;
- Формирование у студентов профессиональных компетенций, связанных с использованием современных теоретических концепций в области физики классических и квантовых неравновесных систем;
- Развитие умений, основанных на полученных знаниях, позволяющих построить модель неравновесного явления в различных физических ситуациях, сделать оценки для наблюдаемых величин и применить адекватный математический аппарат;
- Получение студентами навыков самостоятельной исследовательской работы, предполагающей вывод различных кинетических уравнений вместе с определением области применимости, определение студентами иерархии времен и масштабов применительно к конкретной физической ситуации;
- Анализ степени наблюдаемости и контролируемости изучаемых кинетических эффектов

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием (магистра).

Учебная дисциплина «Физическая кинетика» относится к модулю «Избранные разделы теоретической физики» компонента учреждения высшего образования (по выбору студента).

**Связи с другими учебными дисциплинами.**

Программа составлена с учетом связей со всеми дисциплинами, входящими в курс высшей математики и в курс теоретической физики, изученными студентами ранее, и является непосредственным логическим продолжением дисциплин «Термодинамика и статистическая физика», «Физика конденсированных сред».

### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Физическая кинетика» должно обеспечить формирование универсальных, углубленных профессиональных и специализированных компетенций.

### ***специализированные компетенции:***

СК-7: Быть способным проводить расчеты термодинамических параметров с использованием микроскопической теории процессов в статистически неравновесных системах.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

- кинетическое уравнение Больцмана;
- явный вид интеграла столкновений;
- метод Чепмена-Энскога для приближенного решения кинетического уравнения Больцмана;
- кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа;
- уравнение Фоккера-Планка;
- систему уравнений для бесстолкновительной плазмы.

**уметь:**

- применять кинетическое уравнение Больцмана для решения практических задач расчета и моделирования;
- решать расчетные задачи по теме «коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности неидеальных газов»;
- находить коэффициенты диэлектрической проницаемости холодной плазмы при различных конфигурациях внешнего магнитного поля и падающей электромагнитной волны;
- решать задачи теории флуктуаций.

**владеть:**

- методами практического использования полученных знаний при решении конкретных задач в рамках исследований кинетических явлений в разреженных газах и твердых телах.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 1 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Физическая кинетика» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 90 часов, в том числе 42 аудиторных часа, из них: лекции – 32 часа, семинарские занятия – 6 часов, управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудовое количество учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### **1 Общие положения физической кинетики.**

1.1 *Функция распределения.* Классические и квантовые степени свободы. Принцип детального равновесия. Пространственная и временная четность.

1.2 *Кинетическое уравнение Больцмана.* Интеграл столкновений. H-теорема Больцмана.

### **2 Макроскопические уравнения переноса.**

2.1 *Локально-равновесное течение идеального газа.* Определение макроскопических параметров газа на основе функции распределения.

2.2 *Вывод уравнений гидродинамики идеальной жидкости.* Поток массы, энергии и импульса.

### **3 Приближенное решение уравнения Больцмана.**

3.1 *Приближение Чепмена-Энскога.* Приближение времени релаксации. Приближение Эйлера.

3.2 *Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа.*

### **4 Теплопроводность и вязкость газов.**

4.1 *Теплопроводность газов.* Теплопроводность одноатомного и многоатомных газов. Теплопроводность газа из твердых сфер.

4.2 *Вязкость газов.* Вязкость одноатомного и многоатомных газов.

### **5 Диффузия газов.**

5.1 *Диффузия легкого газа в тяжелом.* Транспортное сечение. Коэффициенты диффузии и термодиффузии.

5.2 *Диффузия тяжелого газа в легком.* Соотношение Эйнштейна.

### **6 Кинетические явления во внешних полях.**

6.1 *Теплопроводность газа во внешнем магнитном и электрическом поле.* Анизотропия теплопроводности. Нечетный эффект для теплопроводности в магнитном поле.

6.2 *Вязкость газа во внешнем магнитном и электрическом поле.* Перекрестные эффекты для вязкости и теплопроводности.

### **7 Диффузионное приближение.**

7.1 *Уравнение Фоккера-Планка для тяжелого газа в легком.* Уравнение Фоккера-Планка для легкого газа в тяжелом. Диффузия в импульсном пространстве.

7.2 *Слабо-ионизированный газ во внешнем электрическом поле.* Подвижность электронов в случае слабых и сильных полей.

### **8 Бесстолкновительная плазма.**

8.1 *Уравнения для бесстолкновительной плазмы.* Кинетическое уравнение в приближении времени релаксации. Электронный газ в постоянном электрическом поле. Пространственная дисперсия в плазме.

8.2 *Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы.* Затухание Ландау.

8.3 *Плазма в магнитном поле.* Диэлектрическая проницаемость магнитоактивной плазмы.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Общие положения физической кинетики.</b>	<b>4</b>						
1.1	Функция распределения. Принцип детального равновесия	2						
1.2	Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений.	1						решение задач
1.3	H-теорема Больцмана.	1						устный опрос
<b>2</b>	<b>Макроскопические уравнения переноса.</b>	<b>4</b>						
2.1	Локально-равновесное течение идеального газа.	2						устный опрос
2.2	Уравнения гидродинамики идеальной жидкости.	2						коллоквиум
<b>3</b>	<b>Приближенное решение уравнения Больцмана.</b>	<b>4</b>						
3.1	Приближение Чепмена-Энскога.	2						устный опрос
3.2	Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа.	2						решение задач
<b>4</b>	<b>Теплопроводность и вязкость газов.</b>	<b>4</b>		<b>3</b>				
4.1	Теплопроводность газов.	2		2				устный опрос
4.2	Вязкость газов.	2		1				коллоквиум
<b>5</b>	<b>Диффузия газов.</b>	<b>4</b>		<b>1</b>			<b>2</b>	
5.1	Диффузия легкого газа в тяжелом. Транспортное	2		1				устный опрос

	сечение							
5.2	Диффузия тяжелого газа в легком.	2					2	коллоквиум по темам № 1-5
<b>6</b>	<b>Кинетические явления во внешних полях.</b>	<b>2</b>						
6.1	Теплопроводность газа во внешнем магнитном и электрическом поле.	1						устный опрос
6.2	Вязкость газа во внешнем магнитном и электрическом поле.	1						решение задач
<b>7</b>	<b>Диффузионное приближение.</b>	<b>4</b>						
7.1	Уравнение Фоккера-Планка.	2						устный опрос
7.2	Слабо-ионизированный газ во внешнем электрическом поле.	2						коллоквиум
<b>8</b>	<b>Бесстолкновительная плазма.</b>	<b>6</b>		<b>2</b>			<b>2</b>	
8.1	Уравнения для бесстолкновительной плазмы. Пространственная дисперсия в плазме.	2		1				устный опрос
8.2	Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Затухание Ландау.	2		1				решение задач
8.3	Плазма в магнитном поле. Диэлектрическая проницаемость магнитоактивной плазмы	2					2	контрольная работа по темам № 4–8
	<b>Итого</b>	<b>32</b>		<b>6</b>			<b>4</b>	

## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Перечень основной литературы**

1. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика : Учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов: В 10 т. / Под ред. Питаевского Л.П. Т.10, Физическая кинетика. — М. : Физматлит, 2002. — 535 с.
2. Базаров, И.П. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. — М. : Изд-во МГУ, 1989. — 240 с.
3. Байков, В.И. Теплофизика. Т. 2. / В.И. Байков, Н.В. Павлюкевич, А.К. Федотов, А.И. Шнип. - Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ, 2014.
4. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. - М.: Дрофа, 2003.
5. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. - М.: Атомиздат, 1979.

### **Перечень дополнительной литературы**

1. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. / Л.И. Седов. - М.: Наука, 1970.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. - М.: Мир, 1969.
3. Исаченко, В.И. Теплопередача / В.И. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергия, 1975.
4. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. М.: Издательство МЭИ, 2005.

### **Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать контрольную работу и коллоквиум. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительную оценку за контрольное мероприятие, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Контрольная работа проводится в письменной форме и включает в себя от 2 до 5 задач. Каждая задача в соответствии с ее сложностью оценивается от 2 до 3 баллов (максимальная сумма баллов за все задачи в контрольной работе равна 10). Количество баллов за каждую решенную задачу



выставляется в зависимости от правильности, полноты и оригинальности ее решения. Нерешенная или решенная полностью неправильно задача оценивается в 0 баллов. Оценка за контрольную работу рассчитывается как сумма баллов, полученных за каждую задачу.

Коллоквиум проводится в письменной форме, и включает в себя 2–3 задания. По согласованию с преподавателем разрешается использовать справочные, научные и учебные печатные издания. Каждая задача в соответствии с ее сложностью оценивается от 3 до 5 баллов (максимальная сумма баллов за все задачи равна 10). Количество баллов за каждую решенную задачу выставляется в зависимости от правильности, полноты и оригинальности ее решения. Нерешенная или решенная полностью неправильно задача оценивается в 0 баллов. Оценка за коллоквиум рассчитывается как сумма баллов, полученных за каждую задачу.

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- коллоквиум – 50 %;
- контрольная работа – 50 %;

При оценке текущей успеваемости 4 балла и более студенты допускаются к экзамену. При оценке ниже 4 баллов решением кафедры студенты не допускаются к экзамену, и им назначается срок выполнения контрольного мероприятия.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценка по текущей успеваемости составляет 30 %, экзаменационная оценка – 70 %.

### **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

Тема № 5.2. Диффузия тяжелого газа в легком (2 ч.)

Примерный перечень вопросов:

1. Физический смысл и условия нормировки для функции распределения.
2. Кинетическое уравнение Больцмана и явный вид интеграла столкновений.
3. Определение макроскопических параметров газа на основе функции распределения.
4. Приближенные методы решения уравнения Больцмана.
5. Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа.
6. Диффузия легкого газа в тяжелом.
7. Связь коэффициентов диффузии и термодиффузии с транспортным сечением.
8. Диффузия тяжелого газа в легком.
9. Соотношение Эйнштейна.

Форма контроля - коллоквиум

Тема № 8.3. Плазма в магнитном поле (2 ч.)

Примерный перечень заданий:

1. Рассчитать проводимость однородной немагнитной плазмы с максвелловским распределением электронов по скоростям, учитывая

столкновения в приближении времени релаксации.

2. Рассчитать и сравнить отношение амплитуд электрического и магнитного полей у альфвеновской волны и у обычной электромагнитной волны.

3. Рассчитать диэлектрическую проницаемость вырожденного электронного газа (в отсутствии внешнего магнитного поля).

4. Рассчитать диэлектрическую проницаемость вырожденного электронного газа в магнитном поле.

5. Рассчитать диэлектрическую проницаемость релятивистского электронного газа (в отсутствии внешнего магнитного поля).

6. Рассчитать коэффициент теплопроводности газа со степенной зависимостью межмолекулярного сечения рассеяния.

7. Рассчитать коэффициент вязкости газа со степенной зависимостью межмолекулярного сечения рассеяния.

8. Рассчитать макроскопические параметры газа по задонной функции распределения.

9. Рассчитать длину и время свободного пробега молекул газа по заданному сечению рассеяния.

Форма контроля - контрольная работа.

#### **Рекомендуемые темы коллоквиумов:**

1. Кинетическое уравнение Больцмана.
2. Явный вид интеграла столкновений.
3. Макроскопические уравнения переноса.
4. Поток массы, энергии и импульса.
5. Методы приближенного решения уравнения Больцмана.
6. Диффузия газов.
7. Коэффициенты диффузии и термодиффузии.
8. Кинетические явления во внешних полях.
9. Уравнение Фоккера-Планка.
10. Уравнения для бесстолкновительной плазмы.
11. Пространственная дисперсия в плазме.
12. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы.
13. Плазма в магнитном поле.
14. Диэлектрическая проницаемость магнитоактивной плазмы.

#### **Примеры задач контрольной работы:**

Тема: «Теплопроводность и вязкость газов» (2 ч.).

Найти температурную зависимость вязкости одноатомного газа из абсолютно твердых сфер с массами  $m$  и радиусом  $r$ .

Форма контроля – контрольная работа.

Тема: «Плазма в магнитном поле. Диэлектрическая проницаемость магнитоактивной плазмы» (2 ч.)

Определить диэлектрическую проницаемость нормально

намагниченного вырожденного электронного газа.

Форма контроля – контрольная работа.

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержание образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- формирование навыков работы с информацией в процессе изучения научной литературы, выработку критического мышления.

При организации образовательного процесса применяются также **методы и приемы развития критического мышления**, используя построение индуктивно-дедуктивных логических связей в процессе нахождения макроскопических характеристик газа (теплопроводность, вязкость и др.) на основе микроскопических параметров межмолекулярного взаимодействия (индукция) и нахождение микроскопических первопричин для таких макроскопических явлений как четный эффект в теплопроводности газа, помещенного в магнитное поле (дедукции).

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

Основой методики организации самостоятельной работы студентов по курсу является предоставление студентам необходимой для работы информации, а также обеспечение регулярных консультаций преподавателя и периодичной отчетности по различным видам учебной и самостоятельной деятельности, а также: обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной проблеме курса; выполнение домашнего задания; работы, предусматривающие решение задач и выполнение упражнений, выдаваемых на практических занятиях; изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку; подготовка к практическим семинарским занятиям; – подготовка к экзамену.

В открытом доступе для студентов размещается следующая информация:

- программа курса с указанием основной и дополнительной литературы;
- учебно-методические материалы;
- график консультаций преподавателя;
- вопросы для проведения экзамена;
- сроки проведения контрольных мероприятий по различным видам учебной деятельности:
  - коллоквиума по изучаемому материалу;

- для дополнительного развития творческих способностей одаренных студентов организуются:
  - студенческие научно-практические конференций, конкурсы;

### **Примерный перечень вопросов к экзамену**

1. Общие положения физической кинетики.
2. Функция распределения. Принцип детального равновесия.
3. Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений.
4. H-теорема Больцмана.
5. Макроскопические уравнения переноса.
6. Вывод уравнений гидродинамики идеальной жидкости. Поток массы, энергии и импульса.
7. Приближенное решение уравнения Больцмана. Приближение Чепмена-Энскога.
8. Кинетическое уравнение для слабо неоднородного газа.
9. Теплопроводность газов. Теплопроводность одноатомного и многоатомных газов.
10. Вязкость газов. Вязкость одноатомного и многоатомных газов.
11. Диффузия легкого газа в тяжелом. Транспортное сечение. Коэффициенты диффузии и термодиффузии.
12. Диффузия тяжелого газа в легком. Соотношение Эйнштейна.
13. Теория броуновского движения. Уравнение Ланжевена. Приближение "белого шума".
14. Кинетические явления во внешних полях.
15. Диффузионное приближение. Уравнение Фоккера-Планка для тяжелого газа в легком. Уравнение Фоккера-Планка для легкого газа в тяжелом.
16. Слабо-ионизированный газ во внешнем электрическом поле. Подвижность электронов в случае слабых и сильных полей.
17. Бесстолкновительная плазма. Уравнения для бесстолкновительной плазмы. Пространственная дисперсия в плазме.
18. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы.
19. Кинетическое уравнение в приближении времени релаксации. Электронный газ в постоянном электрическом поле.
20. Затухание Ландау.
21. Плазма в магнитном поле.
22. Диэлектрическая проницаемость магнитоактивной плазмы.
23. Гауссово распределение вероятности малых флуктуаций.
24. Флуктуации системы, помещенной в термостат.
25. Корреляция флуктуаций во времени. Теорема Винера-Хинчина.
26. Принцип симметрии кинетических коэффициентов (соотношения Онзагера).
27. Потоки и обобщенные силы. Теорема Онзагера.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Современные проблемы фундаментальной физики	Кафедра теоретической физики и астрофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Изменений не требуется (протокол №12 от 23.05.2019)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО  
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на \_\_\_\_/\_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
\_\_\_\_\_ (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_