

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

(подпись)

(дата утверждения)

**О.И. Чуприс**

Регистрационный № УД-341/уч.

## **ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности магистратуры  
1-31 81 02 Фотоника**

Минск 2018

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 81 02-2012, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 24.08.2012 г. № 108 и учебного плана специальности 1-31 81 02 Фотоника, утвержденного 26 мая 2017 г., регистрационный номер № G31-240/уч.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**А.В. Ларькин** – старший преподаватель кафедры энергофизики Белорусского государственного университета.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета  
(протокол № 11 от 17 мая 2018 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 12 от 28 июня 2018 г.).

Заведующий кафедрой, к.ф.-м.н. доцент \_\_\_\_\_ М.С. Тиванов

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Теория переноса» разработана для специальности высшего образования второй ступени (магистратуры) 1-31 81 02 Фотоника.

Учебная дисциплина по выбору «Теория перенос» относится к циклу дисциплин специальной подготовки (компонент учреждения высшего образования).

*Цель учебной дисциплины* – ознакомление студентов магистратуры с физическими основами теории тепло- и массообмена и современными практически решаемыми задачами, решаемыми в рамках данной теории. *Основные задачи учебной дисциплины* – ознакомить студентов магистратуры с основами процессов переноса тепла и массы; способствовать формированию у студентов магистратуры представлений о взаимосвязи явлений переноса импульса, энергии и массы; научить студентов магистратуры понимать возможности практического использования полученных знаний при решении конкретных задач.

Во многих реальных системах распространены являются процессы переноса теплоты (энергии), массы, импульса. Они являются определяющими во многих технологических процессах, энергетических и биологических системах. Учебная дисциплина «Теория переноса» включает рассмотрение физических основ теории переноса; фундаментальных принципов, математического аппарата и методов термомеханики сплошных сред, лежащей в основе процессов тепло- и массопереноса; элементов теории массопереноса, включая диффузию в кристаллических твердых телах; а также изучение основных задач теории переноса импульса, энергии и массы, методов их решения и их практических приложений. Такое построение излагаемого в рамках учебной дисциплины материала способствует развитию у студентов аналитического мышления и способности применять полученные знания на практике. Программа учебной дисциплины содержит перечень вопросов, которые необходимы студентам магистратуры, обучающимся по специальности «Фотоника», для теоретического анализа и практического решения задач теории переноса, в том числе в современных материалах.

При изучении этого курса студенты магистратуры должны усвоить общие положения теории переноса импульса и энергии, изучить базовые поля течений вязкой жидкости, рассмотреть элементы теории пограничного слоя и системы уравнений ламинарного конвективного переноса, познакомиться с основными прикладными задачами теории конвективного теплообмена, усвоить основы теории турбулентного переноса, рассмотреть элементы теории массообмена.

*Материал курса основан* на знаниях и представлениях, заложенных в следующих учебных дисциплинах: «Молекулярная физика», «Теоретическая механика», «Термодинамика и статистическая физика»; он является базовым для последующего изучения учебных дисциплин «Основы теплофизических процессов» / «Проблемы теплофизики гетерогенных сред».

*В результате изучения учебной дисциплины студент должен:*

***знать:***

- систему дифференциальных уравнений переноса;
- безразмерную форму уравнений переноса;
- базовые поля течений вязкой жидкости;
- элементы теории пограничного слоя;
- системы уравнений ламинарного конвективного теплопереноса;
- методы решения практических задач конвективного теплообмена;
- элементы теории турбулентного переноса;
- элементы теории массообмена.

***уметь:***

- применять систему дифференциальных уравнений переноса для решения практических задач расчета и моделирования;
- решать расчетные задачи по теме «базовые поля течений вязкой жидкости» для случая слоистых и неслоистых течений;
- решать расчетные задачи конвективного теплообмена: а) при обтекании плоской пластины, б) при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке, в) при течении жидкости в круглой трубе при постоянной температуре стенки;
- решать задачи теории массопереноса.

***владеть:***

- методами практического использования полученных знаний при решении конкретных задач в рамках исследований процессов тепло- и массопереноса.

*Освоение учебной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:*

***академические компетенции:***

- уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;
- владеть системным и сравнительным анализом;
- владеть исследовательскими навыками;
- уметь работать самостоятельно;
- иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;
- иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

***социально-личностные компетенции:***

- обладать качествами гражданственности;
- быть способным к социальному взаимодействию;
- обладать способностью к межличностным коммуникациям;
- владеть навыками здорового образа жизни.

***профессиональные компетенции:***

– применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы;

– применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы;

– пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения;

– пользоваться глобальными информационными ресурсами;

– реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

***инновационная деятельность:***

– осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям;

– определять цели инноваций и способы их достижения;

– применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины – 78, из них количество аудиторных часов – 36, в том числе лекции – 32 часа, УСР – 4 часа. Количество зачетных единиц – 2.

Занятия проводятся на 2-м курсе магистратуры в 3-м семестре.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – зачет 3 семестре.

Форма получения высшего образования второй ступени – очная, дневная.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### **1 Общие положения теории переноса.**

1.1 *Общие положения теории переноса.* Введение. Тензор напряжений и вектор теплового потока. Уравнения баланса. Конститутивные уравнения.

1.2 *Система дифференциальных уравнений переноса.* Система дифференциальных уравнений переноса. Частные формы уравнений переноса. Краевые условия. Уравнения переноса в координатной форме.

1.3 *Элементы теории размерности.* П–теорема. Безразмерная форма уравнений переноса. Критерии подобия.

### **2 Базовые поля течений вязкой жидкости.**

2.1 *Слоистые течения.* Слоистые течения. Течение Пуазейля – Куэтта. Течение Хагена – Пуазейля в трубе.

2.2 *Слоистые течения в движущихся системах.* Установившееся течение между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. Неустойчивость Тейлора. Плоская стенка в жидкости, внезапно приведенная в движение.

2.3 *Неслоистые течения.* Плоское течение вблизи критической точки. Функция тока. Решение задачи о плоском течении вблизи критической точки.

### **3 Элементы теории пограничного слоя.**

3.1 *Уравнения пограничного слоя.* Понятие о пограничном слое. Уравнения пограничного слоя Прандтля.

3.2 *Задача о пограничном слое на плоской пластине.* Пограничный слой на плоской пластине. Сопротивление трения. Толщина пограничного слоя.

### **4 Системы уравнений ламинарного конвективного переноса.**

4.1 *Уравнения теплового пограничного слоя.* Уравнения теплового пограничного слоя. Аналогия Рейнольдса.

4.2 *Уравнения свободно-конвективного переноса.* Уравнения Буссинеска для свободно-конвективного теплообмена. Критерии подобия для свободной конвекции.

### **5 Задачи конвективного теплообмена.**

5.1 *Конвективный теплообмен около плоских пластин.* Задача о конвективном теплообмене при обтекании плоской пластины. Задача о свободно-конвективном теплообмене около вертикальной пластины.

5.2 *Конвективный теплообмен при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке.* Задача о конвективном теплообмене при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке. Решение задачи о конвективном теплообмене при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке.

5.3 *Теплообмен в круглой трубе при постоянной температуре стенки.* Задача Гретца – Нуссельта. Решение задачи Гретца – Нуссельта. Числа Нуссельта в задаче Гретца – Нуссельта.

5.4 *Текущий контроль знаний.* Текущий контроль знаний студентов по разделам «Общие положения теории переноса», «Базовые поля течений вязкой жидкости», «Элементы теории пограничного слоя», «Системы уравнений ламинарного конвективного переноса» и «Задачи конвективного теплообмена».

## **6 Элементы теории турбулентного переноса.**

6.1 *Турбулентные течения.* Переход к турбулентности. Метод Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного течения.

6.2 *Модели турбулентности.* Гипотеза Буссинеска. Теория пути смешения Прандтля. Характеристики турбулентного пограничного слоя. Характеристики турбулентного теплопереноса.  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности.

## **7 Элементы теории массообмена.**

7.1 *Уравнения теории массообмена.* Основные понятия. Уравнение диффузии. Уравнение энергии.

7.2 *Диффузионный пограничный слой.* Уравнения теории пограничного слоя при наличии массообмена. Массоотдача. Аналогия процессов тепло- и массопереноса.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<b>Общие положения теории переноса</b>	6							
1.1	Общие положения теории переноса	2						[1], [2], [6]	
1.2	Система дифференциальных уравнений переноса	2						[1], [2], [6]	
1.3	Элементы теории размерности	2						[1-5], [7], [8]	
2	<b>Базовые поля течений вязкой жидкости</b>	6							
2.1	Слоистые течения	2						[1], [2], [6], [7]	
2.2	Слоистые течения в движущихся системах	2						[1], [2], [6], [7]	
2.3	Неслоистые течения	2						[1], [2], [6], [7]	
3	<b>Элементы теории пограничного слоя</b>	4							
3.1	Уравнения пограничного слоя	2						[1], [2], [4], [5], [7], [8]	
3.2	Задача о пограничном слое на плоской пластине	2						[1], [2], [4], [5], [7], [8]	
4	<b>Системы уравнений ламинарного конвективного переноса</b>	4							
4.1	Уравнения теплового пограничного слоя	2						[1], [2], [4], [5], [7], [8]	
4.2	Уравнения свободно-конвективного переноса	2						[1], [2], [4], [5], [8]	
5	<b>Задачи конвективного теплообмена</b>	4					4		
5.1	Конвективный теплообмен около плоских пластин	2						[1], [2], [4], [5], [8]	
5.2	Конвективный теплообмен при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке						2	[1], [2], [4], [5], [8]	





## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### *Основная*

1. 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.
2. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003.
3. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1972.
4. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979.
5. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 2005.

#### *Дополнительная*

6. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1970.
7. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Мир, 1969.
8. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975.

### Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине

1. Контрольная работа.

### Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

#### *Рекомендуемые разделы для составления контрольной работы*

1. Общие положения теории переноса.
2. Система дифференциальных уравнений переноса.
3. Элементы теории размерности.
4. Слоистые течения.
5. Уравнения пограничного слоя.
6. Задача о пограничном слое на плоской пластине.
7. Уравнения теплового пограничного слоя.
8. Уравнения свободно-конвективного переноса.
9. Конвективный теплообмен около плоских пластин.
10. Конвективный теплообмен при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке.

11. Теплообмен в круглой трубе при постоянной температуре стенки.
12. Турбулентные течения.
13. Модели турбулентности.
14. Уравнения теории массообмена.
15. Диффузионный пограничный слой.

*Примеры задач контрольной работы*

1. Плоская пластина размером  $20 \times 10$  см обдувается потоком воздуха со скоростью  $1$  м/с вдоль плоскости, перпендикулярной ее длинной кромке. Температура воздуха  $30$  °С, в то время как температура пластины поддерживается на уровне  $100$  °С за счет конденсации пара, подводимого к ее обратной стороне. Рассчитать минимальный расход пара, необходимый для поддержания данных температурных условий. Физические параметры воздуха (при  $30$  °С):  $\rho = 1,165$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1,005$  кДж/кг·К,  $\lambda = 0,0267$  Вт/м·К,  $\mu = 18,6$  мкПа·с. Удельная теплота конденсации пара  $r = 2,256$  МДж/кг.
2. В резервуаре с жидким натрием температура поддерживается на уровне  $200$  °С за счет плоского вертикального нагревательного элемента размером  $20 \times 10$  см, имеющего температуру  $300$  °С. Определить тепловую мощность, передаваемую натрию нагревательным элементом. Физические параметры жидкого натрия (при  $200$  °С):  $\rho = 903$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1,325$  кДж/кг·К,  $\lambda = 81,6$  Вт/м·К,  $\mu = 0,457$  мПа·с. Температурный коэффициент расширения натрия при данном перепаде температур  $\beta = 2,77 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>.

**Рекомендации по контролю качества усвоения знаний  
и проведению аттестации**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине рекомендуется использовать контрольную работу. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой учебной дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, 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. На ее выполнение отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать конспект лекций и калькуляторы для расчетов. Оценка проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как оценка за контрольную работу.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме зачета.

Зачетная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по учебной дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и зачетной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости – 0,4; для экзаменационной оценки – 0,6.

**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)
«Основы теплофизических процессов» / «Проблемы теплофизики гетерогенных сред».	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной программы без изменений	Протокол № 11 от 17 мая 2018 г.

