

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

А.Л. Толстик

(подпись)

(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 2441 /уч.

ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий**

Минск 2016

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 07 -2013 от 30.08.2013 и учебных планов № G31-143/уч и № G31и-179/уч.

СОСТАВИТЕЛИ:

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

А.К. Федотов – профессор кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета
(протокол № 7 от 17 мая 2016 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета
(протокол № 10 от 9 июня 2016 г.).

ка

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Теория переноса» разработана для специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

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

Во многих реальных системах распространенными являются процессы переноса теплоты (энергии), массы, импульса. Они являются определяющими во многих технологических процессах, энергетических и биологических системах. Дисциплина «Основы тепло- и массообмена» 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 дисциплины материала способствует развитию у студентов аналитического мышления и способности применять полученные знания на практике. Программа дисциплины содержит перечень вопросов, которые необходимы студентам, обучающимся по специализации «Функциональные наноматериалы», для теоретического анализа и практического решения задач теории переноса, в том числе в современных материалах.

При изучении этого курса студенты 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, изучить особенности процессов теплообмена и их интенсификации при фазовых превращениях, рассмотреть элементы теории массообмена.

Материал курса основан на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Основы теплофизики», «Физика твердого тела», «Физико-химия наносистем»; он является базовым для последующего изучения дисциплины «Тепло- и массообмен в наноструктурированных многофазных средах».

В результате изучения 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;
- законы диффузии в кристаллах;
- кинетику процессов самодиффузии и диффузии примесей в кристаллах;
- частные решения второго закона Фика;
- механизмы диффузии в кристаллах;
- влияние химического и фазового состава на диффузию в кристаллах;
- диффузию и растворимость примесей в бинарных полупроводниковых соединениях;
- особенности диффузии в полупроводниковых и диэлектрических оксидах;
- влияние внутренних и внешних электрических полей на диффузию в кристаллах.

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, включая диффузию в кристаллических твердых телах.

владеть:

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

Освоение 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 – 140, из них количество аудиторных часов – 64, в том числе лекции – 50 часов, УСР – 14 часов.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен в 8 семестре.

Форма получения высшего образования – 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.

2.4 *Текущий контроль знаний.* Текущий контроль знаний студентов по разделам «Общие положения теории переноса» и «Базовые поля течений вязкой жидкости».

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.

4.3 *Уравнения конвективного теплопереноса в каналах.* Уравнения конвективного теплопереноса в каналах.

5 Задачи конвективного теплообмена.

5.1 *Конвективный теплообмен при обтекании плоской пластины.* Задача о конвективном теплообмене при обтекании плоской пластины.

5.2 *Свободно-конвективный теплообмен около вертикальной пластины.* Задача о свободно-конвективном теплообмене около вертикальной пластины. Решение Польгаузена.

5.3 *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.

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

5.5 *Текущий контроль знаний. Текущий контроль знаний студентов по разделам «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 *Модель турбулентности Прандтля. Гипотеза Буссинеска. Теория пути смешения Прандтля. Характеристики турбулентного пограничного слоя. Характеристики турбулентного теплопереноса.*

6.3 *k – ε модели турбулентности. Высокореинольдсовы k – ε модели. Низкорейнольдсовы k – ε модели.*

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.*

8 Диффузия в кристаллических твердых телах.

8.1 *Законы диффузии в кристаллах. Первый и второй законы Фика. Коэффициент диффузии. Виды диффузии. Кинетика процессов самодиффузии и диффузии примесей в кристаллах. Модель самодиффузии Френкеля.*

8.2 *Частные решения второго закона Фика. Диффузия из непостоянного источника. Вынужденная диффузия. Диффузия из источника конечной толщины. Диффузия из постоянного источника.*

8.3 *Структурные дефекты и диффузия атомов. Характеризация зарядового состояния дефектов и их взаимодействий. Образование дефектов по Шоттки и по Френкелю. Механизмы диффузии в кристаллах. Влияние химического и фазового состава на диффузию в кристаллах.*

8.4 *Диффузия и квазихимические реакции. Теория абсолютных скоростей реакций. Кинетика квазихимических реакций.*

8.5 *Особенности диффузии в кристаллах элементарных полупроводников. Влияние электронно-дырочного равновесия и положения уровня Ферми на диффузию примесей в полупроводниках.*

8.6 *Диффузия и растворимость примесей в бинарных полупроводниковых соединениях. Особенности диффузии в полупроводниковых и диэлектрических оксидах. Влияние внутренних и внешних электрических полей на диффузию в кристаллах.*

8.7 *Текущий контроль знаний. Текущий контроль знаний студентов по разделу «Диффузия в кристаллических твердых телах».*

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	Общие положения теории переноса	6							
1.1	Общие положения теории переноса	2						[1], [2], [7]	
1.2	Система дифференциальных уравнений переноса	2						[1], [2], [7]	
1.3	Элементы теории размерности	2						[1–5], [8], [9]	
2	Базовые поля течений вязкой жидкости	6					4		
2.1.	Слоистые течения	2					2	[1], [2], [7], [8]	Письменное тестирование
2.2	Слоистые течения в движущихся системах	2						[1], [2], [7], [8]	
2.3	Неслоистые течения	2						[1], [2], [7], [8]	
2.4	Текущий контроль знаний						2		Контрольная работа
3	Элементы теории пограничного слоя	4							
3.1	Уравнения пограничного слоя	2						[1], [2], [4], [5], [8], [9]	
3.2	Задача о пограничном слое на плоской пластине	2						[1], [2], [4], [5], [8], [9]	
4	Системы уравнений ламинарного конвективного переноса	6							
4.1.	Уравнения теплового пограничного слоя	2						[1], [2], [4], [5], [9]	
4.2.	Уравнения свободно-конвективного переноса	2						[1], [2], [4], [5], [9]	
4.3.	Уравнения конвективного теплопереноса в каналах	2						[1], [2], [4], [5], [9]	

[illegible]

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.
6. Федотов, А.К., Физическое материаловедение. Ч. 1. Физика твердого тела / А.К. Федотов. – Минск: Вышэйшая школа, 2010.

Дополнительная

7. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1970.
8. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Мир, 1969.
9. 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. Тестовые задания по разделам дисциплины;
2. Контрольные работы.

Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

Рекомендуемые разделы для составления тестовых заданий

1. Общие положения теории переноса.
2. Система дифференциальных уравнений переноса.
3. Элементы теории размерности.
4. Слоистые течения.
5. Неслоистые течения.
6. Уравнения пограничного слоя.
7. Пограничный слой на плоской пластине.
8. Уравнения теплового пограничного слоя.

9. Уравнения свободно-конвективного переноса.
10. Уравнения конвективного теплопереноса в каналах.
11. Конвективный теплообмен при обтекании плоской пластины.
12. Свободно-конвективный теплообмен около вертикальной пластины.
13. Конвективный теплообмен при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке.
14. Теплообмен в круглой трубе при постоянной температуре стенки.
15. Турбулентные течения.
16. Модели турбулентности.
17. Уравнения теории массообмена.
18. Уравнения теории пограничного слоя при наличии массообмена.
19. Первый и второй законы Фика. Коэффициент диффузии.
20. Кинетика процессов самодиффузии и диффузии примесей в кристаллах. Модель самодиффузии Френкеля.
21. Частные решения второго закона Фика.
22. Характеризация зарядового состояния дефектов и их взаимодействий.
23. Механизмы диффузии в кристаллах.
24. Влияние химического и фазового состава на диффузию в кристаллах.
25. Особенности диффузии в кристаллах элементарных полупроводников.
26. Диффузия и растворимость примесей в бинарных полупроводниковых соединениях.
27. Особенности диффузии в полупроводниковых и диэлектрических оксидах.
28. Влияние внутренних и внешних электрических полей на диффузию в кристаллах.

Примеры тестовых заданий

1. а) Какое течение называется слоистым? б) Какое поле скорости описывает плоское течение Пуазейля? в) В чем отличие течения Куэтта от течения Пуазейля – Куэтта? г) При каких условиях в случае течения Пуазейля – Куэтта существуют режимы, в которых есть область возвратного движения жидкости?
2. а) Какие процессы называются процессами конвективного теплопереноса? б) Какой участок движения жидкости называется областью развитого течения? в) Запишите соотношение для числа Нуссельта в случае конвективного теплообмена при течении жидкости в круглой трубе при постоянном тепловом потоке на стенке. г) Какая область температурного поля называется областью регулярного режима?

Примеры задач контрольной работы

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

Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать тестовые задания по разделам дисциплины (теоретические и практические) и устные опросы. 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 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.

Тестирование проводится в письменной форме. Каждый из письменных тестов включает в себя до 5 теоретических вопросов и (или) 1 практическое задание в открытой форме. На выполнение теста отводится 10 – 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать конспект лекций и калькуляторы для расчетов. Оценка каждого из тестов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждое из письменных тестирований.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

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

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название 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 теплофизики	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	17.05.2016 № 7 Рекомендовано к утверждению
Физика твердого тела	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	17.05.2016 № 7 Рекомендовано к утверждению
Физико-химия наносистем	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	17.05.2016 № 7 Рекомендовано к утверждению
Тепло- и массообмен в наноструктурированных многофазных средах.	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	

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

М.С. Тиванов

В.М. Анищик