

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
( ФГБОУ ВО «МГТУ»)

Кафедра технологического и  
холодильного оборудования

**Методические указания  
к самостоятельной работе аспирантов**

**По дисциплине:** Б1.В.06 «Техническая термодинамика и теплопередача»  
код и наименование дисциплины

**Направление подготовки/специальность** 19.06.01 Промышленная экология и биотехнологии  
код направления/специальности

**Направленность/специализация** Процессы и аппараты пищевых производств  
наименование направленности (профиля) /специализации образовательной программы

**Квалификация выпускника** Исследователь. Преподаватель-исследователь  
указывается квалификация (степень) выпускника в соответствии с ФГОС ВО

**Кафедра-разработчик:** кафедра технологического и холодильного оборудования  
название кафедры-разработчика рабочей программы

Мурманск

2019

Разработчик – Голубева Ольга Алексеевна, кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры ТХО.

МУ к СР рассмотрены и одобрены на заседании кафедры - разработчика  
технологического и холодильного оборудования, «25» июня 2019 г., протокол  
№ 10

**СОДЕРЖАНИЕ**

I ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	4
II ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН	4
III СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	6
IV СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ	6

## I ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Целью дисциплины «Техническая термодинамика и теплопередача» является подготовка аспирантов всех форм обучения по направлению 19.06.01 «Промышленная экология и биотехнологии» направленности «Процессы и аппараты пищевых производств» в соответствии с квалификационной характеристикой исследователя и преподавателя-исследователя и рабочим учебным планом, которая предполагает освоение обучаемыми теоретических знаний в области термодинамики и теплопередачи, изучающей закономерности преобразования и передачи тепловой энергии.

Задачами дисциплины является формирование у аспирантов:

- методологического подхода к оценке термодинамических и теплообменных процессов;
- выработка методики решения инженерных и научных задач, в том числе самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для оказания помощи аспиранту в самостоятельном постижении программы дисциплины. Для успешного освоения материала следует изучить теоретический материал по литературным источникам, указанным в каждой теме. Подтвердить полученные знания следует практическими расчётами.

## II ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

**Таблица 1**

№ п/п	Содержание разделов (модулей), тем дисциплины	Количество часов, выделяемых на самостоятельную работу по формам обучения	
		очная	заочная
1	2	3	4
1	Термодинамика как наука о преобразовании энергии. Её цели, задачи.	-	2
2	Характеристические функции. Их свойства. Изохорно-изотермический и изобарно-изотермический потенциалы. Химический потенциал. Теплова теорема Нернста.	2	2
3	Реальные газы и пары. Их отличия от идеальных газов. Уравнения состояния реальных газов. Дифференциальное уравнение состояния реальных газов. Температурные коэффициенты реальных газов. Термодинамические процессы реальных газов. Применение уравнения политропы к исследованию действительных процессов. Водяной пар как теплоноситель, его энтальпия	2	2
4	Основные дифференциальные уравнения термодинамики. Дифференциальные уравнения термодинамики в частных производных. Приложение частных производных к решению ряда термодинамических задач.	6	6

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
5	Термодинамика потока. Внешняя и располагаемая работа при истечении. Адиабатное течение. Истечение капельной жидкости. Скорость истечения и массовый расход газа из суживающегося сопла. Критическое давление и критическая скорость. Профилирование сопел и диффузоров. Основные условия течения идеального газа по каналам переменного сечения. Дозвуковое сопло. Сопло Лавала. Адиабатное течение с трением. Параметры торможения. Истечение водяного пара.	6	6
6	Теплоносители. Вода. Сравнение воды и пара как теплоносителей. Высококипящие теплоносители: минеральные и органические (ВОТ). Теплофизические характеристики ВОТ, сравнение их с водяным паром.	2	2
7	Смещение газов и паров. Смещение в постоянном объеме, в потоке, при заполнении объема.	4	4
8	Энергетический и эксергетический КПД. Основные задачи, стоящие перед современной термодинамикой и перспективные направления её развития.	-	2
9	Теплопередача. Основные способы передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией, излучением. Конвективный и сложный теплообмен.	4	4
10	Основные положения теплопроводности. Температурное поле. Градиент температуры. Основной закон теплопроводности. Коэффициент теплопроводности. Уравнение Фурье. Краевые условия. Коэффициент теплоотдачи. Уравнение Ньютона.	4	4
11	Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме: через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки; через шаровую стенку; через оребренную стенку. Теплопроводность тел произвольной формы. Тепловая изоляция. Выбор теплоизоляционного материала. Критический диаметр изоляции.	6	6
12	Теплопроводность при нестационарном режиме. Основные случаи теплопроводности при нестационарном режиме: неограниченная пластина, цилиндр бесконечной длины, шар.	4	4
13	Конвективный теплообмен. Режимы движения потоков. Тепловой и динамический пограничный слой. Коэффициент теплоотдачи. Дифференциальное уравнение теплообмена. Критерии подобия и критериальные уравнения подобия.	-	4
14	Теплообмен при различных случаях движения потоков: вынужденном движении в трубах; вдоль пластины; поперечном омывании одиночной трубы и пучка труб; при движении в большом объеме; изменении агрегатного состояния. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи во всех случаях движения.	6	6
15	Теплообмен излучением. Его основные характеристики. Основные законы излучения: Фурье-Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Планка, Эйнштейна, Ламберта. Теплообмен излучением между телами. Тепловые экраны.	6	6
16	Методы интенсификации теплообмена и повышения технико-экономических показателей теплового оборудования. Перспективы их развития	-	4
Итого		52	64

### III СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

#### Основная литература

1. Круглов Г.А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. ( 5 экз.)
2. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях : учеб. пособие для вузов / Б. А. Семенов. - Изд. 2-е, доп. - : СПб. ; Москва ; Краснодар : Лань, 2013. - 393 с (3 экз.)
3. Степанов О.А., Захаренко С.О. Основы трансформации теплоты: учебник / О.А. Степанов , С.О. Захаренко. – Санкт-Петербург, Лань, 2019. – 128 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/122152/#2>
4. Теплотехника [Электронный ресурс] : метод. указания к решению задач для студентов специальностей 260302.65 "Технология рыбы и рыбных продуктов", 260501.65 "Технология продуктов общественного питания", 260601.65 "Машины и аппараты пищевых производств", 260602.65 "Пищевая инженерия малых предприятий" всех форм обучения / Федер. агентство по рыболовству, Мурман. гос. техн. ун-т, Каф. технол. и холодиль. оборудования ; сост. О. А. Голубева, А. С. Никонова. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 1.2 Мб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012. - Доступ из локальной сети Мурман. гос. техн. ун-та. - Загл. с экрана.

#### Дополнительная литература

5. Логинов В.С., Юхнов В.Е. Практикум по основам теплотехники. Учебное пособие. - СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 128 с <https://e.lanbook.com/reader/book/112679/#1>
6. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике : учеб. пособие для техникумов / О. М. Рабинович. - Изд. 5-е, перераб. - Москва : Альянс, 2015. - 344 с (49 экз.)
7. Теплотехника [Электронный ресурс] : метод. указания к выполнению расчет.-граф. заданий всех форм обучения / Федер. агентство по рыболовству, Мурман. гос. техн. ун-т, Каф. технол. и холодиль. оборудования ; сост. О. А Голубева, А. С. Никонова. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 1.8 Мб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012

### IV СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

#### ТЕМА 1

Термодинамика как наука о преобразовании энергии. Её цели, задачи.

#### Целевая установка

В результате изучения данной темы аспирант должен:

**знать** роль термодинамики в пищевой промышленности, а также современное состояние и направления её развития

## Методические указания

При изучении материала аспиранту следует обратить внимание на роль отечественных ученых и инженеров – практиков в развитии термодинамики.

Значение термодинамики для промышленности трудно переоценить. Нет такой области техники, где в той или иной мере не приходилось бы решать вопросы, связанные с термодинамическими процессами. В металлургии, машиностроении, химической и пищевой промышленности большое значение имеют вопросы подвода и отвода теплоты, теплообмена между телами, а также вопросы применения машин, работа которых либо непосредственно, либо косвенно связана с протекающими в них тепловыми процессами.

В пищевой промышленности тепловые машины, аппараты и установки используются для получения технологического пара и горячей воды, для выработки тепловой и электрической энергии, для получения искусственного холода и т. д.

При рассмотрении современного состояния и направлений развития термодинамики аспиранту следует обратить внимание на повышение эффективности использования теплоты, особенно на снижение затрат на их производство.

Литература: [1], с.5-14; [5], с. 6-10.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что изучает термодинамика?
2. Расскажите о роли термодинамики для промышленности в целом и для пищевой промышленности в частности.
3. Каковы основные направления и перспективы развития термодинамики?

## ТЕМА 2

Характеристические функции. Их свойства. Изохорно-изотермический и изобарно-изотермический потенциалы. Химический потенциал. Тепловая теорема Нернста.

### Целевая установка

В результате изучения данной темы аспирант должен:

**знать** основные термины и определения, применяемые в технической термодинамике, классификацию термодинамических систем и термодинамических процессов идеальных газов, основные термические параметры состояния;

**уметь** вычислять значение любого из трех параметров состояния идеального газа по известным двум параметрам для 1 кг и произвольного количества газа, рассчитывать параметры газовых смесей.

## Методические указания

При изучении данной темы необходимо усвоить терминологию и основные понятия, используемые при рассмотрении процессов взаимодействия термодинамической системы и окружающей среды, взаимного превращения теплоты и работы, при вычислении параметров состояния идеального газа и газовых смесей.

Для закрепления изученного материала рекомендуется ответить на вопросы и решить предложенные задачи. При выполнении расчетов следует иметь в виду, что за нормальные условия в технической термодинамике принимаются следующие:  $P_{\text{му}} = 101326 \text{ Па}$ ,  $T_{\text{му}} = 273,15\text{К}$ .

Литература: [1], с.14-32; [5], с. 6-10.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что понимают под термодинамической системой? Дайте классификацию термодинамических систем.
2. Назовите основные термодинамические параметры состояния рабочего тела и напишите их размерности.
3. Назовите параметры, входящие в уравнение состояния идеального газа.
4. Объясните физический смысл удельной и универсальной газовых постоянных и напишите их размерности.
5. Напишите уравнение состояния для 1 кг, n кг, 1 кмоль, n кмоль идеального газа.
6. Что такое газовая смесь? В чём сущность закона Дальтона?
7. Как определить среднюю молярную массу и удельную газовую постоянную смеси?
8. Для пуска дизелей используется сжатый воздух. Определить отношение абсолютных давлений в баллоне, если до пуска манометр показывал 5,4 МПа, а после пуска - 2,94 МПа. Давление окружающей среды 742 мм рт. ст. при температуре 293,15 К.
9. В сосуде находится воздух под разрежением 10 кПа при температуре 0 °С. Ртутный барометр показывает 99725 Па при температуре ртути 20 °С. Определить удельный объём воздуха в баллоне при этих условиях.
10. Смесь двух объёмов водорода и одного объёма кислорода называется гремучим газом. Определить газовую постоянную гремучего газа.

### ТЕМА 3

Реальные газы и пары. Их отличия от идеальных газов. Уравнения состояния реальных газов. Дифференциальное уравнение состояния реальных газов. Температурные коэффициенты реальных газов. Термодинамические



процессы реальных газов. Применение уравнения политропы к исследованию действительных процессов. Водяной пар как теплоноситель, его энтальпия

### Целевая установка

В результате изучения данной темы аспирант должен:

**знать** принципиальные отличия реальных газов и паров от идеальных, фазовые переходы веществ, процессы парообразования и конденсации;

**уметь** вычислять параметры состояния воды, водяного пара и влажного воздуха с использованием таблиц и диаграмм в  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$ ,  $s$ - $i$  и  $d$ - $i$  – координатах.

### Методические указания

Приступая к изучению этой темы, аспирант должен четко уяснить, что расчетные формулы, применявшиеся при изучении идеальных газов, в данном случае, как правило, недействительны и только при очень низких давлениях и высоких температурах реальные газы по своим свойствам приближаются к идеальным.

При рассмотрении отдельных уравнений реального газа (уравнение Ван – дер – Ваальса, уравнение Вакуловича – Новикова и др.) необходимо ясно представлять, на каких физических принципах строятся эти уравнения и как из них получаются уравнения состояния идеальных газов.

Изучая диаграммы воды и водяного пара в  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$  и  $s$ - $i$  координатах, необходимо разобраться в возможностях применения той или иной диаграммы для практических расчетов параметров состояния воды, влажного насыщенного, сухого насыщенного и перегретого пара.

Рассматривая изменение параметров состояния влажного воздуха в  $d$ - $i$  – диаграмме, следует ясно представлять, почему процессы нагревания и охлаждения влажного воздуха протекают при постоянном влагосодержании, а процессы сушки в идеальной сушильной установке - при неизменной энтальпии.

Литература: [1], с.6-18; [2], с.17-26; [4], с.13-26; [5], с. 17 – 28.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение процессов кипения, испарения, парообразования и конденсации.
2. Какой пар называется сухим насыщенным, влажным насыщенным, перегретым?
3. Как изменяется теплота парообразования при изменении давления?
4. Какие параметры характеризуют состояние влажного, сухого и перегретого пара?
5. Покажите на  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$  и  $s$ - $i$  диаграммах воды и водяного пара характерные области и линии фазовых переходов.

6. Напишите формулы для вычисления удельного объёма, энтропии, энтальпии и внутренней энергии влажного водяного пара.
7. Дайте определение влажного воздуха, абсолютной и относительной влажности, точки росы.
8. Опишите диаграмму Рамзина для влажного воздуха.
9. Покажите на  $d-i$  – диаграмме изображение основных процессов изменения состояния влажного воздуха.
10. Как определить состояние влажного воздуха с помощью  $d-i$  – диаграммы, если известны показания сухого и мокрого термометров психрометра?
11. В сушилку помещён материал, от которого необходимо отвести 3000 кг воды. Температура наружного воздуха  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  при относительной влажности 0,4. Перед входом в сушилку воздух подогревается в калорифере и входит в неё при температуре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 0,85. Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.

#### ТЕМА 4

Основные дифференциальные уравнения термодинамики.  
Дифференциальные уравнения термодинамики в частных производных.  
Приложение частных производных к решению ряда термодинамических задач.

#### Целевая установка

В результате изучения данной темы аспирант должен:

**знать** основные термины и определения, применяемые в системе дифференциальных уравнений;

**уметь** вычислять значение любого из параметров термодинамической системы с применением соответствующего дифференциального уравнения.

#### Методические указания

При изучении данной темы необходимо усвоить терминологию и основные понятия, используемые при рассмотрении процессов взаимодействия термодинамической системы и окружающей среды, взаимного превращения теплоты и работы.

Литература: [1], с.19-24; [3], с. 10-19; [5], с. 30-39

#### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что понимают под дифференциальным уравнением термодинамики?
2. Назовите основные термодинамические параметры состояния рабочего тела и напишите их размерности.

3. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности для стационарного режима.
4. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарного режима.
5. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности для неподвижной частицы при стационарном режиме.
6. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности для подвижной частицы при стационарном режиме.

## ТЕМА 5

Термодинамика потока. Внешняя и располагаемая работа при истечении. Адиабатное течение. Истечение капельной жидкости. Скорость истечения и массовый расход газа из суживающегося сопла. Критическое давление и критическая скорость. Профилирование сопел и диффузоров. Основные условия течения идеального газа по каналам переменного сечения. Дозвуковое сопло. Сопло Лавалья. Адиабатное течение с трением. Параметры торможения. Истечение водяного пара.

### Целевая установка

В результате изучения данной темы аспирант должен:

**знать** допущения, которые принимаются при выводе уравнения энергии газового потока, влияние трения на течение газа или пара, принципиальную разницу между адиабатным дросселированием и адиабатным обратимым процессом расширения, примеры практического использования эффекта дросселирования;

**уметь** выполнять расчет сужающегося сопла и сопла Лавалья, изображать процессы течения с трением в  $s-T$  и  $s-i$  - координатах.

### Методические указания

При изучении данной темы аспиранту следует особое внимание уделить процессам дросселирования, которые широко используются для понижения температуры сжиженных паров хладагентов в парокомпрессионных холодильных установках. При этом необходимо понять смысл температуры инверсии и инверсионной кривой. Последняя делит всю область диаграммы изменения температуры вещества от давления на две части. Область внутри кривой инверсии имеет положительное значение коэффициента дросселирования, и процесс адиабатного дросселирования сопровождается охлаждением вещества. Такие процессы используют для получения низких и криогенных температур путем применения в схемах холодильных машин регулирующих клапанов или дроссельных вентилялей.

Литература: [4], с.54-61; [6], с.209-216.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что такое работа проталкивания, и какой она может иметь знак?
2. В чём состоит физический смысл критической скорости?
3. Почему в закритической области расход газа не зависит от перепада давлений?
4. Что такое сопло и диффузор?
5. Опишите процесс дросселирования газов и паров.
6. В чём особенность адиабатного дросселирования?
7. Приведите примеры положительного и отрицательного дроссельного эффекта.
8. Как изменяются параметры потока при дросселировании?

### ТЕМА 6

Теплоносители. Вода. Сравнение воды и пара как теплоносителей. Высококипящие теплоносители: минеральные и органические (ВОТ). Теплофизические характеристики ВОТ, сравнение их с водяным паром.

#### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** основные теплофизические характеристики теплоносителей, имеющие основополагающее значение для процессов передачи тепла.

**уметь** выполнять расчёты процессов переноса тепла для различных теплоносителей и производить сравнительный анализ теплоносителей с водой и паром.

#### Методические указания

При изучении данной темы аспиранту необходимо четко представлять основные критерии сравнения различных теплоносителей. При этом следует иметь в виду, что самыми распространёнными теплоносителями являются вода и пар. Однако, условия проведения тепловых и тепло-массообменных процессов достаточно часто требуют использования высококипящих теплоносителей.

Литература: [1], с.26-36; [5], с.18-26.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что называется теплоносителем?
2. Какие теплофизические характеристики определяют состояние теплоносителя?
3. Опишите процесс передачи тепла от источника теплоты к приёмнику с использованием теплоносителя?

4. Как рассчитать коэффициент теплопередачи от источника теплоты к приёмнику через теплоноситель?
5. Какие процессы составляют процесс теплопередачи?
6. Что называется теплообменной системой?
7. Назовите области применения пара в качестве теплоносителя.
8. В каких областях вода применяется в качестве теплоносителя?

### ТЕМА 7

Смещение газов и паров. Смещение в постоянном объеме, в потоке, при заполнении объема.

#### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** особенности смешивания газов и паров в постоянном объеме, в потоке, при заполнении.

**уметь** выполнять расчёты процессов смешивания газов и паров.

#### Методические указания

При изучении данной темы аспиранту необходимо четко представлять процессы смешивания газов и паров при различных условиях. При этом следует иметь в виду, что параметры смеси можно определить как аналитическим путём, так и графическим, с помощью *i-d* диаграммы.

Литература: [4], с.5-12; [6], с.55-56.

#### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что называется газовой смесью?
2. Какие теплофизические характеристики определяют состояние газовой смеси?
3. Как определить состояние газовой смеси графическим методом?
4. Как определить состояние газовой смеси аналитическим методом?
5. Сформулируйте закон Дальтона?
6. Какими способами задаётся газовая смесь?
7. Что называется массовой долей?
8. Дайте определение объёмной доли.
9. Как перевести массовые доли в объёмные?

### ТЕМА 8

Энергетический и эксергетический КПД. Основные задачи, стоящие перед современной термодинамикой и перспективные направления её развития.

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** понятие эксергии, суть и назначение эксергетического анализа

**уметь** применять знания эксергетического анализа к решению конкретных задач.

### Методические указания

Рассматривая эксергетический метод исследования, аспирант должен четко усвоить, что в общем случае эксергией называется удельная работоспособность теплоты, или потока рабочего тела, в обратимом термодинамическом процессе изменения состояния системы от начальных параметров ее состояния до постоянных параметров внешней среды. Эксергетический анализ удобен при исследовании сложных технических устройств, в которых используется энергия в различных формах, - работа, теплота, энергия химических превращений и т. д.

Литература: [1], с. 94 - 111; [6], с.31-46.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Как получить максимальную полезную работу термодинамического цикла?
2. Что такое эксергия?
3. Что характеризует изменение эксергии?
4. Что характеризует эксергетический КПД?
5. Где и для чего применяется эксергетический анализ?
6. Что характеризует полная эксергия термодинамической системы?

### ТЕМА 9

Теплопередача. Основные способы передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией, излучением. Конвективный и сложный теплообмен.

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** основные понятия и определения теплопередачи, виды переноса теплоты, понятия конвективного и сложного теплообмена.

**уметь** применять знания по данной теме решению конкретных задач.

## Методические указания

При изучении данной темы аспиранту необходимо четко уяснить различие процессов переноса теплоты теплопроводностью, конвекцией и излучением, а также физическую сущность понятий «теплоотдача» и «теплопередача». При этом следует иметь в виду, что в чистом виде теплопроводность имеет место только в твердых телах, а конвекция в жидкостях и газах. Теплоотдача является необходимой составной частью теплопередачи и может быть конвективной, лучистой или совместной (сложной). Лучистый теплообмен между телами в отличие от теплопроводности и конвекции может осуществляться и в вакууме, т. е. при отсутствии промежуточной вещественной среды.

Литература: [1], с. 94 - 111; [4], с.54-61; [7], с.31-46.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какие Вы знаете виды переноса теплоты?
2. В чём их принципиальное отличие различных видов переноса теплоты?
3. Какова природа передачи теплоты при сложном теплообмене?
4. В чём отличие процесса теплоотдачи от процесса теплопередачи?
5. Что такое температурное поле?
6. Какие виды температурных полей Вы знаете?
7. От чего зависит коэффициент теплопередачи?
8. Что называется конвективным теплообменом?
9. Из каких составляющих складывается коэффициент теплоотдачи при сложном теплообмене?

## ТЕМА 10

Основные положения теплопроводности. Температурное поле. Градиент температуры. Основной закон теплопроводности. Коэффициент теплопроводности. Уравнение Фурье. Краевые условия. Коэффициент теплоотдачи. Уравнение Ньютона.

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** основные понятия и определения теплопроводности, физическую сущность и виды переноса теплоты, основной закон теплопроводности, влияние температуры на теплопроводность газов, жидкостей и металлов.

## Методические указания

При изучении данной темы аспиранту необходимо четко уяснить различие процессов переноса теплоты теплопроводностью, конвекцией и излучением, а также физическую сущность понятий «теплоотдача» и «теплопередача». При этом следует иметь в виду, что в чистом виде теплопроводность имеет место только в твердых телах, а конвекция в жидкостях и газах. Теплоотдача является необходимой составной частью теплопередачи и может быть конвективной, лучистой или совместной (сложной). Лучистый теплообмен между телами в отличие от теплопроводности и конвекции может осуществляться и в вакууме, т. е. при отсутствии промежуточной вещественной среды.

Литература: [1], с.94-111; [4], с.45-53; [5], с.32-41

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какие Вы знаете виды переноса теплоты? В чём их принципиальное отличие?
2. Какова природа передачи теплоты излучением?
3. В чём отличие процесса теплоотдачи от процесса теплопередачи?
4. Что такое температурное поле? Какие виды температурных полей Вы знаете?
5. Что называется изотермической поверхностью? Дайте определение градиента температуры.
6. Что такое поверхностная плотность теплового потока? Какова его размерность?
7. Сформулируйте основной закон теплопроводности.
8. Как изменяется теплопроводность металлов, жидкостей и газов в зависимости от температуры?
9. Что называется коэффициентом теплоотдачи? Какова его размерность?
10. Дайте характеристику коэффициента температуропроводности.

### ТЕМА 11

Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме: через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки; через шаровую стенку; через ребренную стенку. Теплопроводность тел произвольной формы. Тепловая изоляция. Выбор теплоизоляционного материала. Критический диаметр изоляции.



## Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** граничные условия первого, второго и третьего рода при решении задач теплопроводности и теплопередачи при стационарном режиме, вывод уравнений, определяющих закон распределения температур по толщине стенки и количество теплоты, передаваемой через стенку, способы уменьшения термических сопротивлений;

**уметь** анализировать влияние внутренних и внешних термических сопротивлений на процессы теплопередачи, оценивать целесообразность применения теплоизоляционного материала.

## Методические указания

Рассматривая теплопроводность различных тел при стационарном режиме, аспирант должен обратить внимание на те допущения, которые используются при выводе дифференциальных уравнений и получении их решений, позволяющих построить распределение температур по толщине стенки и найти общее количество теплоты, передаваемой через стенку. При оценке целесообразности применения изоляции для уменьшения тепловых потерь следует учесть, что критический диаметр изоляции не зависит от размеров трубопровода и определяется только значениями коэффициентов теплоотдачи от поверхности изоляции. При проектировании теплообменных аппаратов требуется интенсификация теплопередачи, т.е. уменьшение термического сопротивления, что может быть осуществлено увеличением теплопередающей поверхности со стороны наименьшего коэффициента теплоотдачи.

Литература: [1], с.94-111; [4], с.45-53; [5], с.34-39.

## Вопросы и задачи для самопроверки

1. Как определить температуру между слоями в многослойной и цилиндрической стенках?
2. Что такое общее термическое сопротивление, и из каких величин оно складывается?
3. От каких величин зависит линейный коэффициент теплопередачи для плоской и цилиндрической стенок?
4. Что такое критический диаметр изоляции и как его определить?
5. При каких условиях изоляция цилиндрической трубы будет уменьшать потери теплоты теплоносителя?
6. В каких случаях и как можно интенсифицировать процесс теплопередачи?
7. Плоская стальная стенка, толщиной 10 мм (коэффициент теплопроводности 40 Вт/(м·К), с одной стороны омывается газами, при этом

коэффициент теплоотдачи  $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . С другой стороны, стенка изолирована от окружающего воздуха плотно прилегающей к ней пластиной, толщиной 20 мм с коэффициентом теплопроводности  $0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от пластины к воздуху равен  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить плотность теплового потока и температуру поверхности стенок, если температура газов  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , а воздуха –  $5^\circ\text{C}$ .

## ТЕМА 12

Теплопроводность при нестационарном режиме. Основные случаи теплопроводности при нестационарном режиме: неограниченная пластина, цилиндр бесконечной длины, шар.

### Методические указания

При изучении нестационарной теплопроводности надо обратить внимание на решение конкретных задач с помощью критериев Био и Фурье, твердо усвоив их физический смысл и влияние на протекание процессов нагревания тел.

Литература: [1], с.66-81; [5], с.56-76.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение теплопроводности.
2. Что такое нестационарный режим?
3. Какова основная задача при рассмотрении процессов нестандартной теплопроводности?
4. Напишите математическое выражение граничных условий первого, второго и третьего рода.
5. Что характеризует критерий Био?
6. В чём физический смысл критерия Фурье?
7. Опишите методику расчёта нагрева и охлаждения простейших тел с помощью критериев Био и Фурье.

## ТЕМА 13

Конвективный теплообмен. Режимы движения потоков. Тепловой и динамический пограничный слой. Коэффициент теплоотдачи. Дифференциальное уравнение теплообмена. Критерии подобия и критериальные уравнения подобия

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** понятия конвективного теплообмена, теплового и динамического пограничных слоёв, коэффициента теплоотдачи; виды конвекции, режимы

движения теплоносителя, основные критерии подобия, характеризующие конвективный теплообмен, их физический смысл;

**уметь** подбирать и применять основные критериальные зависимости, которые соответствуют конкретному виду задачи.

### Методические указания

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей. Из всех видов теплообмена конвективный теплообмен является наиболее сложным для исследования, поскольку при расчетах передачи теплоты конвекцией необходимо знать числовые значения коэффициента теплоотдачи для каждого конкретного случая. Системы уравнений, определяющая конвективный теплообмен, позволяет определить коэффициент теплоотдачи только для ограниченного числа простейших задач и то с определенными допущениями. В общем случае определение коэффициента теплоотдачи приводит к необходимости проведения большого числа экспериментов на натурном объекте исследования. Отмеченные трудности устраняются при использовании теории подобия физических процессов, позволяющей проводить исследования на модели, а результаты опытов на модели распространить на все подобные явления. Теория подобия позволяет получить критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи. Аспиранту нужно четко уяснить физический смысл основных критериев и уметь применять их в составе тех критериальных зависимостей, которые соответствуют конкретной задаче при рассмотрении конвективного теплообмена.

Литература: [1], с.82-92; [5], с.78-93.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что называется конвекцией?
1. Что такое конвективный теплообмен?
2. Дайте определение теплового и гидродинамического слоя и объясните их физический смысл.
3. Тепловой и динамический пограничные слои отличаются по толщине? Ответ поясните.
4. Перечислите виды движения теплоносителя и объясните физическую сущность этих процессов.
5. Какие критерии называются определяемыми и определяющими?
6. Какими числами подобия характеризуется конвективный теплообмен?
7. Что характеризует коэффициент теплоотдачи?

8. Каков механизм передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их теплообменную поверхность?

9. Определить коэффициент теплоотдачи и количество переданной теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром 0,02 м и длиной 10 м со скоростью 0,3 м/с, если температура воды - 80 °С, температура стенки трубы – 30 °С.

## ТЕМА 14

Теплообмен при различных случаях движения потоков: вынужденном движении в трубах; вдоль пластины; поперечном омывании одиночной трубы и пучка труб; при движении в большом объеме; изменении агрегатного состояния. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи во всех случаях движения.

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** особенности основных случаев конвективного теплообмена при различных случаях движения потоков, влияние различных факторов на теплообмен при движении жидкости, при поперечном обтекании труб, при изменении агрегатного состояния вещества;

**уметь** рассчитывать коэффициенты теплоотдачи при различных движениях теплоносителя, при поперечном обтекании труб, расположенных в коридорном и шахматном порядке, при конденсации и кипении, применять основные критериальные зависимости, которые соответствуют конкретному виду задачи.

### Методические указания

При изучении данной темы аспиранту следует иметь в виду, что роль коэффициента теплоотдачи не аналогична роли коэффициента теплопроводности в законе Фурье, так как коэффициент теплопроводности является теплофизическим параметром среды, значение которого может быть взято из справочных таблиц. Коэффициент теплоотдачи представляет собой сложную функцию тепловых и динамических процессов, развивающихся в среде в непосредственной близости от поверхности теплообмена, которая зависит от режима движения теплоносителя, теплофизических свойств теплоносителя и геометрических факторов, связанных с конфигурацией системы конвективного теплообмена.

Литература: [3], с.30-58; [5], с.56-76.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение коэффициента теплоотдачи
2. От каких параметров зависит коэффициент теплоотдачи?

3. Назовите особенности теплообмена при вынужденном движении теплоносителя внутри труб.

4. Напишите критериальное уравнение, описывающее теплообмен при вынужденном движении теплоносителя внутри труб.

5. В чём особенность теплообмена в большом объёме?

6. Каким критериальным уравнением описывается теплообмен в большом объёме?

7. Какой критерий в критериальном уравнении указывает на свободное движение теплоносителя?

8. Чем плёночная конденсация отличается от капельной?

9. Изобразите график изменения коэффициента теплоотдачи при плёночной конденсации на вертикальной стенке. Сравните его с графиком изменения коэффициента теплоотдачи при капельной конденсации на вертикальной стенке.

## ТЕМА 15

Теплообмен излучением. Его основные характеристики. Основные законы излучения: Фурье-Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Планка, Эйнштейна, Ламберта. Теплообмен излучением между телами. Тепловые экраны.

### Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** принципиальные отличия теплообмена излучением от теплообмена теплопроводностью и конвекцией, законы теплового излучения и границы их применения, особенности излучения газообразных тел;

**уметь** применять законы теплового излучения к решению конкретных задач.

### Методические указания

Рассматривая процессы теплообмена излучением, аспирант должен особое внимание обратить на количественные соотношения между поглощенной, отраженной и пропущенной через тело энергиями. Для защиты объектов от лучистой энергии необходимо устанавливать тепловые экраны, максимально отражающие лучистую энергию. С целью увеличения эффективности экранов их целесообразно выполнять из материала с малым коэффициентом собственного излучения и повышенной отражательной способностью (алюминий, фольга, белая жемчужная бумага). При этом уменьшение потока теплоты будет обусловлено не только отражательной способностью экрана, но и уменьшением температурного напора, определяющего величину теплового потока. Если же необходимо получить максимальное количество лучистой энергии, передаваемой телу, воспринимающему эту энергию, ему необходимо придать такие свойства, чтобы оно не отражало, а поглощало тепловую

энергию (покрытие поверхности тела краской, применение шероховатой поверхности). При решении конкретных задач лучистого теплообмена между твердыми телами необходимо ясно представлять те допущения, которые положены в основу расчета: собственное и отраженное излучение всех тел, между которыми происходит лучистый теплообмен, подчиняется закону Ламберта: тела непрозрачны, внешние поверхности – изотермические; среда между телами прозрачна для излучения, а коэффициенты поглощения и черноты тела не зависят от температуры.

Радиационно – конвективный теплообмен очень сложен для рассмотрения, что затрудняет как аналитические, так и экспериментальные исследования сложного теплообмена. В связи с этим для практических расчетов используют принцип независимости конвективного и лучистого потоков, что оказывается верным, если один из них значительно меньше другого. Так, для учета теплоотдачи излучением к коэффициенту теплоотдачи конвекцией, подсчитанному обычным образом, т. е. без учета влияния радиационного теплообмена на профили температур, рекомендуется прибавлять условный коэффициент теплоотдачи излучением.

Литература: [1], с.103-104; [5], с.110-114

### **Вопросы и задачи для самопроверки**

1. Что такое теплообмен излучением? Какова природа энергии излучения?
2. Что называется поглощательной, излучательной и отражательной способностью тела?
3. Какая поверхность тела называется белой, абсолютно белой, абсолютно чёрной, зеркальной?
4. От каких величин зависит эффективность излучения?
5. Перечислите законы теплового излучения. Дайте графическое изображение закона Планка?
6. Что характеризует степень черноты?
7. Объясните назначение тепловых экранов и докажите эффективность их установки.
8. В чём особенность излучения газообразных тел?
9. Как определяется суммарный коэффициент теплоотдачи при сложном теплообмене?

### **ТЕМА 16**

Методы интенсификации теплообмена и повышения технико-экономических показателей теплового оборудования. Перспективы их развития.

## Целевая установка

При изучении этой темы аспирант должен:

**знать** возможные методы повышения интенсивности теплообмена; перспективы применения методов интенсификации теплообмена для повышения эффективности работы тепло- и массообменного оборудования;

**уметь** применять методы интенсификации теплообмена к решению конкретных инженерных задач.

## Методические указания

Эффективность и надежность тепло- и массообменных аппаратов имеют большое значение для экономичной работы установки в целом, поэтому вопросам расчета, проектирования и эксплуатации теплообменных аппаратов, а также перспективным разработкам по их совершенствованию необходимо уделять большое внимание. Совершенствование тепло- и массообменного оборудования должно позволить либо снизить расход дорогостоящих материалов для вновь создаваемых установок, уменьшить их габариты и облегчить компоновку в целом, либо экономить теплоту на действующих установках в условиях эксплуатации.

Литература: [1], с.200-204; [5], с.124- 128

## Вопросы и задачи для самопроверки

1. Перечислите основные методы повышения интенсивности теплообмена.
2. Назовите области применения методов интенсификации теплообмена.
3. Опишите перспективы применения методов интенсификации теплообмена для повышения эффективности работы тепло- и массообменного оборудования.