

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

## **ТЕПЛОТЕХНИКА**

### **Сборник учебно-методических материалов**

Для направлений подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и  
производств, 21.05.04 – Горное дело

Благовещенск, 2017

*Печатается по решению  
Редакционно-издательского совета  
Энергетического факультета  
Амурского государственного  
университета*

Составитель: Артюшевская Е.Ю. Теплотехника: сборник учебно-методических материалов для направлений подготовки 15.03.04, 21.05.04. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017

©Амурский государственный университет, 2017  
© Кафедра энергетики, 2017  
© Артюшевская Е.Ю., составитель

## Содержание

1. Краткий курс лекций	4
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	17
3. Методические рекомендации к лабораторным занятиям	17
4. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов	25
5. Библиографический список	27

## 1. КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ

### **Тема 1. Основные понятия и определения.**

Теплотехника – наука, которая изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепловых машин, аппаратов и устройств. Теплота используется во всех областях деятельности человека. Для установления наиболее рациональных способов его использования, анализа экономичности рабочих процессов тепловых установок и создания новых, наиболее совершенных типов тепловых агрегатов необходима разработка теоретических основ теплотехники.

Объектом исследования является термодинамическая система, которой могут быть группа тел, тело или часть тела. То, что находится вне системы, называется окружающей средой. Термодинамическая система это совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергией друг с другом и окружающей средой. Изолированная система - термодинамическая система, не взаимодействующая с окружающей средой. Адиабатная (теплоизолированная) система – система имеет адиабатную оболочку, которая исключает обмен теплотой (теплообмен) с окружающей средой.

Однородная система – система, имеющая во всех своих частях одинаковый состав и физические свойства. Гомогенная система – однородная система по составу и физическому строению, внутри которой нет поверхностей раздела (лед, вода, газы). Гетерогенная система – система, состоящая из нескольких гомогенных частей (фаз) с различными физическими свойствами, отделенных одна от другой видимыми поверхностями раздела (лед и вода, вода и пар).

Величины, которые характеризуют физическое состояние тела, называются термодинамическими параметрами состояния. Такими параметрами являются удельный объем, абсолютное давление, абсолютная температура, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, концентрация, теплоемкость и т.д.

Основные термодинамические параметры состояния  $P$ ,  $v$ ,  $T$  однородного тела зависят друг от друга и взаимосвязаны между собой определенным математическим уравнением, который называется уравнением состояния:

Совокупность изменений состояния термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое называется термодинамическим процессом. Термодинамические процессы бывают равновесные и неравновесные.

### **Тема 2. Первый закон термодинамики.**

Тела, участвующие при протекании термодинамического процесса обмениваются энергией. Передача энергии от одного тела к другому происходит двумя способами.

Первый способ реализуется при непосредственном контакте тел, имеющих различную температуру, путем обмена кинетической энергией между молекулами соприкасающихся тел либо лучистым переносом внутренней энергии излучающих тел путем электромагнитных волн. При этом энергия передается от более нагретого тела к менее нагретому. Количество энергии, переданной данным способом от одного тела к другому, называется количеством теплоты, а способ – передача энергии в форме теплоты.

Второй способ связан с наличием силовых полей или внешнего давления. Для передачи энергии этим способом тело должно либо передвигаться в силовом поле, либо изменять свой объем под действием внешнего давления, То есть передачи энергии происходит при условии перемещения всего тела или его части в пространстве. При этом количество переданной энергии называется работой, а способ передачи энергии в форме работы.

В общем случае внутренней энергией называется совокупность всех видов энергий, заключенной в теле или системе тел. Эту энергию можно представить как сумму отдельных видов энергий: кинетической энергии молекул (поступательного и вращательного движения

молекул); колебательного движения атомов в самой молекуле; энергии электронов; внутриядерной энергии; энергии взаимодействия между ядром молекулы и электронами; потенциальной энергии молекул.

Первый закон термодинамики является основой термодинамической теории и имеет огромное прикладное значение при исследовании термодинамических процессов. Этот закон является законом сохранения и превращения энергии: "Энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических процессах".

Истинная теплоемкость рабочего тела определяется отношением количества подведенной (отведенной) к рабочему телу теплоты в данном термодинамическом процессе.

Теплоемкость зависит от внешних условий или характера процесса, при котором происходит подвод или отвод теплоты.

Уравнение состояния идеального газа можно вывести из молекулярно-кинетической теории или из совместного рассмотрения законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Это уравнение было выведено в 1834 г. французским физиком Клапейроном и для 1 кг массы газа имеет вид:  $P \cdot v = R \cdot T$

Газовой смесью понимается смесь отдельных газов, вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ (компонент) в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси.

### **Тема 3. Второй закон термодинамики.**

Первый закон термодинамики утверждает, что теплота может превращаться в работу, а работа в теплоту и не устанавливает условий, при которых возможны эти превращения. Превращение работы в теплоту происходит всегда полностью и, безусловно. Обратный процесс превращения теплоты в работу при непрерывном её переходе возможен только при определенных условиях и не полностью. Теплота сама собой не переходит от более нагретых тел к холодным. Переход теплоты от холодных тел к нагретым сам собой не происходит. Для этого нужно затратить дополнительную энергию.

Таким образом, для полного анализа явления и процессов необходимо иметь кроме первого закона термодинамики еще дополнительную закономерность. Этим законом является второй закон термодинамики. Он устанавливает, возможен или невозможен тот или иной процесс, в каком направлении протекает процесс, когда достигается термодинамическое равновесие и при каких условиях можно получить максимальную работу.

Энтропия есть однозначная функция состояния тела, принимающая для каждого состояния вполне определенное значение. Она является экстенсивным (зависит от массы вещества) параметром состояния и в любом термодинамическом процессе полностью определяется начальным и конечным состоянием тела и не зависит от пути протекания процесса.

Идеальный цикл Карно имеет максимальную тепловую эффективность по сравнению с другими возможными циклами в заданном интервале температур, поэтому все реальные циклы всегда сравнивают с ним, что позволяет определить степень их совершенства. Цикл Карно состоит из двух обратимых адиабат и двух обратимых изотерм. Под обратимыми изотермами понимают такие изотермы цикла, температуры которых равны температурам горячего и холодного источников, то есть в этом случае, нет температурного напора между рабочим телом и источниками, а, следовательно, отсутствует и внешняя необратимость. Теорема Карно гласит, что термический КПД идеального цикла Карно, осуществляемого в заданном интервале температур, не зависит от физических свойств рабочего тела, при помощи которого этот цикл осуществляется.

#### **Тема 4. Термодинамические процессы.**

Идеализация реальных газов, справедливая при низких давлениях и высоких температурах. Свойства реальных газов близки к свойствам идеального газа. Полученные для идеального газа результаты являются приближенными. Идеализация задачи должна определяться требуемой точностью расчета. Преимущество использования понятия идеального газа – простое уравнение состояния, возможность получить результаты в конечном виде.

Задачи изучения термодинамических процессов: разработка методов расчета параметров состояния системы в процессе; определение характеристик обмена энергией с окружающей средой; теплообмен; совершаемая работа. Предполагается выполнение условий термодинамического равновесия в ходе процесса. Для определения совершаемой работы и передаваемого количества теплоты удобно использовать  $T,s$  – диаграммы.

Изохорный процесс. Такой процесс совершается рабочим телом, находящимся в объеме при неподвижном поршне. В изохорном процессе все подводимое количество теплоты идет на увеличение внутренней энергии. На  $T,s$  – диаграмме изохорный процесс изображается логарифмической кривой.

Изобарный процесс. Такой процесс совершается рабочим телом, находящимся в объеме под поршнем без трения, давление равно давлению окружающей среды. Работа газа в изобарном процессе положительна, только если температура газа увеличивается.

В изобарном процессе теплота, подведенная к рабочему телу, расходуется на увеличение его энтальпии. Температура тела (и внутренняя энергия) изменяется, поэтому на совершение работы расходуется лишь часть подведенной теплоты.

Адиабатный процесс совершается без подвода теплоты из окружающей среды. Политропный процесс – это процесс с постоянной теплоемкостью. Является обобщением рассмотренных выше основных процессов.

#### **Тема 5. Термодинамика потока.**

Уравнение первого закона термодинамики для потока газа при следующих допущениях: движение газа по каналу установившееся и неразрывное; скорости по сечению, перпендикулярному оси канала, постоянны; пренебрегается трение частичек газа друг другу и о стенки канала; изменение параметров по сечению канала мало по сравнению их абсолютными значениями, и имеет вид:  $q = \Delta u + \Delta e + I_{\text{прот.}} + I_{\text{техн.}}$

Если при перемещении газа по каналу происходит его расширение с уменьшением давления и увеличением скорости, то такой канал называется соплом.

Если в канале происходит сжатие рабочего тела с увеличением его давления и уменьшением скорости, то такой канал называют диффузором.

Критическим давлением называется такое давление на выходном сечении канала, при котором достигается максимальный расход газа.

Критической скоростью называется скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического

Комбинированное сопло Лаваля предназначено для использования больших перепадов давления и для получения скоростей истечения, превышающих критическую или скорость звука. Сопло Лаваля состоит из короткого суживающегося участка и расширяющейся конической насадки.

Дросселированием называется явление, при котором пар или газ переходит с высокого давления на низкое без совершения внешней работы и без подвода или отвода теплоты. Такое явление происходит в трубопроводе, где имеется место сужения проходного канала.

## **Тема 6. Реальные газы. Водяной пар. Влажный воздух.**

Реальные газы отличаются от идеальных газов тем, что молекулы этих газов имеют объемы и связаны между собой силами взаимодействия, которые уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами.

Наиболее простым и качественно верно отображающим поведение реального газа, является уравнение Ван-дер-Ваальса:  $(P + a/v^2) \cdot (v - b) = R \cdot T$ .

$a$ ,  $b$  – постоянные величины, первая учитывает силы взаимодействия, вторая учитывает размер молекул.

$a/v^2$  – характеризует добавочное давление, под которым находится реальный газ вследствие сил сцепления между молекулами и называется внутренним давлением.

Одним из распространенных рабочим телом в паровых турбинах, паровых машинах, в атомных установках, теплоносителем в различных теплообменниках является водяной пар.

Пар – газообразное тело в состоянии, близкое к кипящей жидкости. Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное. Испарение – парообразование, происходящее всегда при любой температуре с поверхности жидкости. При некоторой определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления, под которым она находится, начинается парообразование во всей массе жидкости. Этот процесс называется кипением. Обратный процесс парообразования называется конденсацией. Она также протекает при постоянной температуре. Процесс перехода твердого вещества непосредственно в пар называется сублимацией.

Обратный процесс перехода пара в твердое состояние называется десублимацией. При испарении жидкости в ограниченном пространстве (в паровых котлах) одновременно происходит обратное явление – конденсация пара. Если скорость конденсации станет равной скорости испарения, то наступает динамическое равновесие. Пар в этом случае имеет максимальную плотность и называется насыщенным паром.

Атмосферный воздух, в основном состоящий из кислорода, азота, углекислого газа, содержит всегда некоторое количество водяного пара.

Смесь сухого воздуха и водяного пара называется влажным воздухом.

Влажный воздух при данном давлении и температуре может содержать разное количество водяного пара. Если смесь состоит из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, то его называют насыщенным влажным воздухом. В этом случае во влажном воздухе находится максимально возможное для данной температуры количество водяного пара. При охлаждении этого воздуха, будет происходить конденсация водяного пара. Парциальное давление водяного пара в этой смеси равно давлению насыщения при данной температуре.

## **Тема 7. Термодинамические циклы.**

Термодинамическим циклом, или круговым процессом, называют термодинамический процесс, в котором термодинамическая система, претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние. Все параметры и функции состояния, изменяясь в процессе, в конце цикла принимают исходные значения. Работа, совершаемая термодинамической системой за цикл, равна сообщаемому ей количеству теплоты.

Циклы паротурбинных установок (ПТУ). Паротурбинная установка является основой современных тепловых и атомных электростанций. Рабочим телом в таких установках является пар какой-либо жидкости (водяной пар). Основным циклом в паротурбинной установке является цикл Ренкина. Процесс получения работы в таком цикле происходит следующим образом. В паровом котле и в перегревателе теплота горения топлива передается воде. Полученный пар поступает в турбину, где происходит преобразование теплоты в механическую работу, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе. Отработанный пар поступает в конденсатор, где отдает теплоту охлаждающей воде. Полученный конденсат насосом отправляется в питательный бак, откуда питательным насосом сжимается до давления, равного в котле, и подается через подогреватель в паровой котел.

Циклы двигателей внутреннего сгорания. Двигателями внутреннего сгорания называются тепловые машины, в которых теплота к рабочему телу подводится в результате сгорания топлива непосредственно внутри двигателя. Рабочим телом ДВС на первом этапе в процессах всасывания и сжатия является воздух или смесь воздуха с легко воспламеняющимся топливом, на втором этапе в процессе рабочего хода – продукты сгорания жидкого или газообразного топлива.

Давления рабочего тела в ДВС не слишком велики, а температуры намного превышают критические, так что рабочее тело можно рассматривать как идеальный газ.

К преимуществам ДВС, относятся: компактность, т.к. горячий источник находится внутри самого двигателя и, следовательно, отпадает необходимость в теплообменных поверхностях, через которые передается теплота к рабочему телу (РТ); возможность получения относительно высокого КПД, т.к. в цилиндрах двигателя может быть обеспечена высокая температура горячего источника.

Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Основными недостатками поршневых двигателей внутреннего сгорания являются ограниченность их мощности и невозможность адиабатного расширения рабочего тела до атмосферного давления, которые отсутствуют в газотурбинных установках (ГТУ). ГТУ рабочим телом являются продукты сгорания жидкого или газообразного топлива. Простейшая схема работы газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении выглядит так: топливным насосом и компрессором топливо и воздух через форсунки поступают в камеру сгорания. Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла, где они расширяются, и поступают на лопатки газовой турбины.

### **Тема 8. Теплообмен.**

Теория теплообмена изучает процессы распространения теплоты в твердых, жидких и газообразных телах. Перенос теплоты может передаваться тремя способами: теплопроводностью; конвекцией; излучением.

Процесс передачи теплоты теплопроводностью происходит при непосредственном контакте тел или частицами тел с различными температурами и представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты. При нагревании тела, кинетическая энергия его молекул возрастает и частицы более нагретой части тела, сталкиваясь с соседними молекулами, сообщают им часть своей кинетической энергии.

Конвекция – это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа. При этом, перенос теплоты зависит от скорости движения жидкости или газа прямо пропорционально. Этот вид передачи теплоты сопровождается всегда теплопроводностью. Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. 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. Процесс передачи теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн называется излучением (радиацией). Этот процесс происходит в три стадии: превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию электромагнитных волн, распространение э/м волн в пространстве, поглощение энергии излучения другим телом.

Совокупность всех трех видов теплообмена называется сложным теплообменом. Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения агрегатного состояния рабочих сред и т.д. В зависимости от этого теплообмен протекает по-разному и описывается различными уравнениями.

### **Тема 9. Виды теплопередачи.**

Теплопередачей называется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю через стенку, разделяющую эти теплоносители.

Примерами теплопередачи являются: передача теплоты от греющей воды нагревательных элементов (отопительных систем) к воздуху помещения; передача теплоты от дымовых газов к воде через стенки кипятильных труб в паровых котлах; передача теплоты от раскаленных газов к охлаждающей воде (жидкости) через стенку цилиндра двигателя внутреннего сгорания; передача теплоты от внутреннего воздуха помещения к наружному воздуху и т. д. При этом ограждающая стенка является проводником теплоты, через которую теплота передается теплопроводностью, а от стенки к окружающей среде конвекцией и излучением. Поэтому процесс теплопередачи является сложным процессом теплообмена.

### **Тема 10. Теплопроводность.**

Теплопроводностью называется способность материальных тел к переносу энергии (теплообмену) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела, осуществляемому хаотически движущимися частицами тела. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества. Теплопроводностью называется также количественная характеристика способности тела проводить тепло. Количественно способность вещества проводить тепло характеризуется коэффициентом теплопроводности. Эта характеристика равна количеству теплоты, проходящему через однородный образец материала единичной длины и единичной площади за единицу времени при единичной разнице температур (1 К). Основным законом теплопроводности является закон Фурье о пропорциональности теплового потока температурному градиенту.

### **Тема 11. Теплоотдача. Конвективный теплообмен.**

Конвективным теплообменом называется одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

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.

Процесс теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона-Рихмана, которая гласит, что количество теплоты, передаваемая конвективным теплообменом прямо пропорционально разности температур поверхности тела и окружающей среды.

Теория подобия – это наука о подобных явлениях. Подобными явлениями называются такие физические явления, которые одинаковы качественно по форме и по содержанию, т.е. имеют одну физическую природу, развиваются под действием одинаковых сил и описываются одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями и краевыми условиями.

Обязательным условием подобия физических явлений должно быть геометрическое подобие систем, где эти явления протекают. Два физических явления будут подобны лишь в том случае, если будут подобны все величины, которые характеризуют их. Для всех подобных систем существуют безразмерные комплексы величин, которые называются критериями подобия.

Основные положения теории подобия формулируют в виде 3-х теорем подобия. Первая теорема: Подобные явления имеют одинаковые критерии подобия. Вторая теорема: Любая зависимость между переменными, характеризующая какие-либо явления, может быть представлена, в форме зависимости между критериями подобия, составленными из этих переменных, которая будет называться критериальным уравнением. Третья теорема: Два

явления подобны, если они имеют подобные условия однозначности и численно одинаковые определяющие критерии подобия.

Критерии подобия, представляющие собой отношения одноимённых физических параметров системы (например, отношения длин), называются тривиальными и при установлении определяющих критериев подобия обычно не рассматриваются: равенство их для двух систем является определением физического подобия. Нетривиальные безразмерные комбинации, которые можно составить из определяющих параметров, и представляют собой критерии подобия.

Критерий Рейнольдса – этот критерий определяет соотношение между силами инерции и силами вязкости в потоке теплоносителя.

Критерий Грасгофа характеризует интенсивность свободного движения, которая зависит от соотношения между подъемной силой, обусловленной разницей плотности в отдельных точках изотермического потока, и сил вязкого трения. Этот критерий является определяющим в процессах, связанных с естественной конвекцией.

Критерий Прандтля составлен из физических параметров вещества и является физическим параметром. Данный критерий характеризует соотношение между скоростью обмена механической энергией между частицами жидкости (за счёт вязкости) и скоростью обмена тепловой энергией (за счёт теплопроводности –  $a$ ). Критерий Нуссельта — один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности (в условиях неподвижной среды).

Критерий  $Pr$  – критерий физических свойств вещества и является определяющим критерием. Для некоторых капельных жидкостей (вода, масло, глицерин) с ростом температуры в величина  $Pr$  сильно уменьшается.

Критерий Пекле, этот критерий представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи  $\alpha$ , и интенсивностью теплопроводности в пограничном слое потока жидкости ( $\lambda_{ж}$ ). Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  всегда является величиной искомой, неизвестной в задачах о конвективном теплообмене.

Критерий Маха характеризует сжимаемость газового потока; поэтому его изменение влияет на процессы теплообмена при значениях  $M$ , когда эта сжимаемость ощутима.

Критерии подобия, являющиеся независимыми переменными ( $Re$ ,  $Pr$  и др.), называют определяющими критериями, а зависимые – определяемыми. Очевидно, что искомая (определяемая) величина является функцией независимых (определяющих) величин, входящих в систему уравнений

## **Тема 12. Тепловое излучение.**

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриатомных процессов. Природа всех лучей одинакова. Они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны.

Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела. Электромагнитные волны различаются между собой длиной волны. В зависимости от длины волны лучи обладают различными свойствами.

Если поверхность поглощает все падающие на нее лучи, т. е.  $A = 1$ ,  $R = 0$  и  $D = 0$ , то такую поверхность называют абсолютно черной. Если поверхность отражает полностью все падающие на нее лучи, то такую поверхность называют абсолютно белой. При этом  $R = 1$ ,  $A = 0$ ,  $D = 0$ . Если тело абсолютно проницаемо для тепловых лучей, то  $D = 1$ ,  $R = 0$  и  $A = 0$ .

Закон Планка. Интенсивности излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависят от температуры и длины волны.

Закон Стефана-Больцмана — интегральный закон излучения абсолютно чёрного тела. Определяет зависимость плотности мощности излучения абсолютно чёрного тела от его

температуры.  $E_s = C_s (T/100)^4$ , где  $C_s = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела

Закон Кирхгофа. Отношение лучеиспускательной способности тела к его поглотительной способности одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

### **Тема 13. Теплопередача.**

При передаче теплоты от стенки к окружающей среде в основном преобладает конвективный теплообмен, поэтому в курсе рассматриваются такие задачи: теплопередача через плоскую стенку; теплопередача через цилиндрическую стенку.

Теплообменным аппаратом называют всякое устройство, в котором одна жидкость — горячая среда, передает теплоту другой жидкости - холодной среде. В качестве теплоносителей в тепловых аппаратах используются разнообразные капельные и упругие жидкости в самом широком диапазоне давлений и температур. По принципу работы аппараты делят на регенеративные, смесительные и рекуперативные. В регенеративных аппаратах горячий теплоноситель отдает свою теплоту аккумулирующему устройству, которое в свою очередь периодически отдает теплоту второй жидкости - холодному теплоносителю, т. е. одна и та же поверхность нагрева омывается то горячей, то холодной жидкостью.

В смесительных аппаратах передача теплоты от горячей к холодной жидкости происходит при непосредственном смешении обеих жидкостей, например смешивающие конденсаторы.

Целью теплового расчета является определение поверхности теплообмена, а если последняя известна, то целью расчета является определение конечных температур рабочих жидкостей. Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса.

### **Тема 14. Состав топлива.**

Топливом называется горючее вещество, используемое в качестве источника получения теплоты в энергетических, промышленных и отопительных установках.

В зависимости от типа реакций, в результате которых выделяется теплота из топлива, различают органическое и ядерное топливо.

По агрегатному состоянию топлива органического происхождения разделяются на твердые, жидкие и газовые (газообразные).

По происхождению органические топлива делятся на природные (естественные) и искусственные, получаемые различными методами.

Основные характеристики топлива: зольность, влажность и выход летучих веществ.

Основными моторными топливами являются бензины и дизельные топлива, получаемые путем переработки нефти. Кроме этого также используют сжатые и сжиженные газы; синтетические топлива, получаемые переработкой угля, сланцев, битуминозных песков; спирты; эфиры.

### **Тема 15. Горение топлива.**

Горение топлива – химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя используют кислород воздуха.

Процессы горения разделяют на 2 группы: гомогенное горение – горение газообразных горючих (характеризуется системой "газ+газ"); гетерогенное горение – горение твердых и жидких горючих (характеризуется системой "твердое тело+газ" или "жидкость+газ").

Процесс горения может протекать с разной скоростью – от медленного до мгновенного. Медленное горение – самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение представляет собой взрыв. В теплоэнергетических установках практическое значение имеет такая скорость реакции, при которой происходит устойчивое горение, т.е. при постоянной подаче в зону горения топлива и окислителя. При этом соотношение концентрации топлива и окислителя должен быть определенным. При нарушении этого соотношения (богатая смесь, бедная смесь) скорость реакции снижается и уменьшается тепловыделение на единицу объема.

Горение – это в основном химический процесс, т.к. в результате его протекания происходит качественные изменения состава реагирующих масс. Но в то же время химическая реакция горения сопровождается различными физическими явлениями: перенос теплоты, диффузионный перенос реагирующих масс и др.

#### **Тема 16. Вопросы экологии и энергосбережения при использовании теплоты.**

Продукты сгорания оказывают определяющее влияние на энергетические и экологические показатели различных теплотехнических установок.

В первую очередь к числу экологически вредных продуктов сгорания следует отнести так называемые токсичные газы.

*Токсичными* называют вещества, оказывающие негативные воздействия на организм человека и окружающую среду. Основными токсичными веществами являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ), различные углеводороды ( $\text{CH}$ ), сажа и соединения, содержащие свинец и серу.

Оксиды азота. При сгорании топлив главным образом образуется оксид азота  $\text{NO}$ , который затем в атмосфере окисляется до  $\text{NO}_2$ . Образование  $\text{NO}$  увеличивается с ростом температуры газов и концентрации кислорода и не зависит от углеводородного состава топлива. Находящийся в атмосфере  $\text{NO}_2$  представляет собой газ красновато-бурого цвета, обладающий в больших концентрациях удушливым запахом.  $\text{NO}_2$  оказывает негативное воздействие на слизистые оболочки глаз и дыхательных путей.

Оксид углерода ( $\text{CO}$ ) образуется во время сгорания при недостатке кислорода или при диссоциации  $\text{CO}_2$ . Основное влияние на образование  $\text{CO}$  оказывает состав смеси: чем она богаче, тем выше концентрация  $\text{CO}$ . Оксид углерода – бесцветный и не имеющий запаха газ. При вдыхании вместе с воздухом он интенсивно соединяется с гемоглобином крови, что уменьшает ее способность к снабжению организма кислородом. Симптомы отравления организма газом  $\text{CO}$ : головная боль, сердцебиение, затруднение дыхания и тошнота.

Углеводороды ( $\text{CH}$ ) состоят из исходных или распавшихся молекул топлива, которые не принимали участия в сгорании. Углеводороды появляются в отработавших газах ( $\text{ОГ}$ ) двигателей внутреннего сгорания вследствие гашения пламени вблизи относительно холодных стенок камеры сгорания, в “защемленных” объемах, находящихся в вытеснителях и в зазоре между поршнем и цилиндром над верхним компрессионным кольцом.

Для оценки концентраций токсичных выбросов принято сравнивать их фактические концентрации с предельно допустимыми (максимально разовыми, среднесуточными или среднегодовыми).

На основании многочисленных эпидемиологических и токсикологических исследований установлено, что воздействие каждого из вредных компонентов может привести к определенным негативным последствиям.

Одним из основных продуктов сгорания углеводородных топлив является диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), который не относится к токсичным газам. Годовая эмиссия  $\text{CO}_2$  составляет 130...1100 млрд. т/год. Основное количество  $\text{CO}_2$  производится природными источниками, и только примерно 1...3 % связаны с технической деятельностью человека (антропогенные выбросы). Однако эти 1...3% могут нарушать равновесие в атмосфере и служить причиной возникновения так называемого “парникового” эффекта.

В верхних слоях атмосферы всегда располагалась смесь газов, состоящая на 60... 90 % из водяного пара. Эта смесь газов препятствует отводу теплоты от поверхности нашей планеты, повышая ее среднюю температуру на 33°C (от -18°C до +15°C). В увеличении средней температуры на поверхности земли и заключается “парниковый” эффект, который обусловил благоприятные условия для возникновения и развития жизни на Земле. Однако в результате деятельности человека в стратосфере и тропосфере стали накапливаться такие вещества как CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, галогенированные углеводороды, озон и гемииоксид азота (NO<sub>2</sub>). Суммарная доля этих газов в “парниковом” слое относительно невелика всего 0,5... 15%. Однако они вызвали за последние 100 лет повышение средней температуры примерно на 0,45°C, что выразилось в известном потеплении климата. При дальнейшем неконтролируемом усилении “парникового” эффекта может произойти интенсивное таяние ледников, которое может привести к глобальной катастрофе.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практическое занятие – это один из предусмотренных учебным планом видов учебной работы, где отрабатываются и закрепляются навыки и знания, полученные студентами на лекционных занятиях, а также умение самостоятельно работать с литературой. Поэтому работа над выполнением практического задания должна быть результатом тщательного изучения рекомендованной по данной теме научной и учебной литературы

Во время работы над теоретическими вопросами практического задания рекомендуется делать выписки наиболее важных определений, доказательств и теоретических выводов. Эти выписки помогают лучше усвоить и закрепить в памяти прочитанный материал, облегчают его систематизирование, позволяют не возвращаться снова к уже изученной литературе.

План проведения практического занятия:

1. Вводная часть включает формулировку темы и цели занятия; повторение теоретических сведений по теме;

2. Основная часть предполагает самостоятельное выполнение заданий студентами. Сопровождается дополнительными разъяснениями по ходу работы (при необходимости), текущим контролем и оценкой результатов работы;

3. Заключительная часть содержит: подведение общих итогов занятия; оценку результатов работы студентов; ответы на вопросы студентов; выдачу рекомендаций по устранению пробелов в системе знаний и умений студентов, по улучшению результатов работы; задание на дом для закрепления пройденного материала и по подготовке к следующему практическому занятию.

При изучении материалов по каждой теме выполняется ряд задач. Примерный перечень задач по темам представлен ниже.

### **Тема 1. Уравнения состояния идеальных газов**

Задача 1.1. Определить плотность и удельный объем окиси углерода CO при давлении 1 бар и температуре 300°K.

Задача 1.2. Для определения теплоты сгорания топлива в калориметрической бомбе применяется кислород из баллона объемом 0,006 м<sup>3</sup> при абсолютном давлении  $p = 120$  бар и температуре  $T = 300^\circ\text{K}$ . Определить, на сколько зарядов хватит кислорода, если объем бомбы 0,0004 м<sup>3</sup>, а абсолютное давление кислорода в бомбе 22 бар при температуре  $T = 300^\circ\text{K}$ .

Задача 1.3. Какую массу грузов может поднять воздушный шар объемом 1000 м<sup>3</sup> при температуре 300°K и давлении 1 бар, если он заполнен водородом.

Задача 1.4. Определить массу кислорода в баллоне емкостью 200 л при давлении 120 бар и температуре 17°С.

### **Тема 2. Смесь идеальных газов**

Задача 2.1. Определить среднюю молекулярную массу сухого атмосферного воздуха, если принять, что он состоит по объему из 21% O<sub>2</sub> и 79% N<sub>2</sub>.

Задача 2.2. Определить газовую постоянную, плотность и парциальные давления для смеси, состоящей из 20 массовых долей воздуха и одной массовой доли светильного газа. Плотность светильного газа при температуре 273°K и давлении 101325 н/м<sup>2</sup> равна 0,52 кг/м<sup>3</sup>.

### **Тема 3. Первый закон термодинамики**

Задача 3.1. Определить часовой расход топлива, необходимого для работы паровой турбины мощностью 500 кВт, если теплотворность топлива 30000 кдж/кг, к.п.д. установки 20%.

Задача 3.2. 10 кг воздуха при начальной температуре 30°C изменяют свое состояние до конечной температуры 300°C. Определить изменение внутренней энергии воздуха, считая его идеальным газом.

Задача 3.3. В котельной электростанции за 10 ч работы сожжено 100 т каменного угля с теплотворностью 28 000 кДж/кг. Определить количество, выработанной электроэнергии и мощность электростанции, если к.п.д. станции 20%.

#### **Тема 4. Теплоемкость газов. Энтропия**

Задача 4.1. Воздух, имеющий начальные параметры  $p_1 = 10$  бар;  $V = 0,4$  м<sup>3</sup> и  $t_1 = 127^\circ\text{C}$ , нагревается при постоянном объеме до температуры 327°C. Определить массу воздуха, конечное давление и количество подводимой теплоты.

Задача 4.2. Смешивается воздух двух потоков: холодный с температурой 10°C и горячий с температурой 1000°C; смесь имеет температуру 100°C. Определить массовые доли холодного и горячего воздуха, считая давление холодного, горячего и смеси воздуха одинаковым,

Задача 4.3. При постоянном давлении к 1 кг воздуха подводится  $q_p = 5000$  кДж/кг теплоты. Найти  $t_2$ , если  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ .

Задача 4.4. Определить изменение энтропии 1 кг O<sub>2</sub> в процессе расширения. Начальные параметры O<sub>2</sub>:  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ .  $p_1 = 3,0$  Мн/м<sup>2</sup> ( $p_1 = 30$  бар); конечные:  $t_2 = 400^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,4$  Мн/м<sup>2</sup> ( $p_2 = 4$  бар). Расчет произвести для двух случаев: 1) при постоянной теплоемкости; 2) при переменной теплоемкости.

#### **Тема 5. Термодинамические процессы**

Задача 5.1. В баллоне объемом 0,12 м<sup>3</sup> содержится воздух при абсолютном давлении 10-155 Н/м<sup>2</sup> И температуре 50°C. Определить конечное давление, количество теплоты и изменение энтропии при повышении температуры воздуха до 150°C.

Задача 5.2. 2 кг воздуха при постоянном абсолютном давлении в 2 бар и температуре 288°K расширяется до конечной температуры 423°K. Определить конечный объем воздуха, количество подведенной теплоты, работу расширения.

Задача 5.3. 12 кг воздуха при абсолютном давлении в 6 бар и температуре 300°K расширяются при постоянной температуре, при этом объем увеличивается в 4 раза. Определить начальные и конечные параметры воздуха, количество подведенной теплоты и работу расширения.

Задача 5.4. 2 кг воздуха при начальном абсолютном давлении 10 бар и температуре 600°K расширяются по адиабате до конечного давления 1 бар. Определить конечный объем, конечную температуру, работу расширения. Показатель адиабаты для двухатомных газов  $k=1,4$

#### **Тема 6. Второй закон термодинамики**

Задача 6.1. Воздух в противоточном теплообменнике нагревается от температуры  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , а газы охлаждаются от температуры  $t_3 = 450^\circ\text{C}$  до температуры  $t_4 = 200^\circ\text{C}$ . Тепловые потери теплообменника составляют 20% от теплоты, отдаваемой газом. Определить потерю работоспособности на 1 кг проходящего газа вследствие необратимого теплообмена. Газ и воздух считать идеальными газами, обладающими свойствами воздуха. Теплоемкость воздуха и газов считать величинами постоянными. Температура окружающей среды равна  $t_0 = 25^\circ\text{C}$

Задача 6.2. Определить работоспособность (эксергию) 1 кг воздуха, находящегося под давлением  $p_1 = 4,0$  Мн/м<sup>2</sup> или  $p_1 = 40$  бар и имеющего температуру  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ . Температура и давление окружающей среды  $t_0 = 27^\circ\text{C}$  и  $p_0 = 1$  бар. Задачу решить при постоянной и переменной теплоемкостях.

Задача 6.3. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы в политропном процессе нагреть 5 кг воздуха от  $T_1 = 300^\circ \text{K}$  при давлении  $p_1 = 4$  бар до температуры  $1000^\circ \text{K}$  при давлении 10 бар. Теплоемкость воздуха  $C_p = 1$  кдж/(кг·град).

Задача 6.4. Определить среднеинтегральную и среднеарифметическую температуры газа в политропном процессе, если начальная температура  $T_1 = 800^\circ \text{K}$ , а конечная  $T_2 = 2000^\circ \text{K}$ .

### **Тема 7. Водяной пар. Влажный воздух**

Задача 7.1. Определить параметры влажного насыщенного, водяного пара при давлении 20 бар и степени сухости  $x = 0,9$ .

Задача 7.2. Определить состояние пара, если дано: 1)  $p = 10$  бар и  $v = 0,17 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; 2)  $p = 12$  бар и  $t = 200^\circ \text{C}$ .

Задача 7.3. Определить состояние водяного пара при давлении 15 бар, если на его получение из воды с температурой  $0^\circ \text{C}$  было затрачено 2400 кдж/кг теплоты.

Задача 7.4. Определить массу и энтальпию  $0,5 \text{ м}^3$  влажного пара со степенью влажности 10% и давлением 10 бар.

Задача 7.5. Определить расход теплоты в пароперегревателе на 1 кг пара, если параметры при входе:  $p_1 = 80$  бар и  $x_1 = 0,95$ ; при выходе:  $p_2 = 80$  бар и  $t = 500^\circ \text{C}$ .

### **Тема 8. Термодинамические циклы**

#### Циклы двигателей внутреннего сгорания

Задача 8.1. Для идеального цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить параметры всех основных точек, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический к. п. д. цикла Карно по условиям задачи, термический к. п. д. цикла, среднее индикаторное давление, если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 320^\circ \text{K}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 4,0$ , степень повышения давления  $\lambda = 4,0$ . Рабочее тело — воздух с газовой постоянной  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Теплоемкость рабочего тела принять постоянной.

Задача 8.2. Для идеального поршневого двигателя с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  определить параметры всех основных точек, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический к. п. д. цикла, термический к. п. д. цикла Карно по условиям задачи, среднее индикаторное давление, если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 350^\circ \text{K}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 20$ , степень изобарного расширения  $\rho = 2$ ; рабочее тело - воздух с газовой постоянной  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Теплоемкость рабочего тела принять постоянной. Расчет ведется на 1 кг рабочего тела.

#### Циклы газотурбинных установок

Задача 8.3. Для идеального цикла ГТУ с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  определить параметры характерных точек, работу расширения, сжатия и полезную, количество подведенной и отведенной теплоты, термический к. п. д. цикла. Начальные параметры рабочего тела:  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 300^\circ \text{K}$ ; степень увеличения давления в компрессоре при адиабатном процессе сжатия  $\beta = p_2/p_1 = 10$ ; показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Температура в точке 3 не должна превышать  $1000^\circ \text{K}$ ; рабочее тело — воздух; теплоемкость воздуха постоянная; расчет проводится на 1 кг рабочего тела.

Задача 8.4. В цикле газовой турбины с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  начальные параметры рабочего тела  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 300^\circ \text{K}$ . Степень увеличения давления в адиабатном процессе сжатия  $\beta = p_2/p_1 = 10$ ;  $k = 1,4$ . Температура в точке 3 не должна превышать  $1000^\circ \text{K}$ . Рабочее тело — воздух; теплоемкости постоянные; расчет проводится на 1 кг рабочего тела.

Определить параметры всех основных точек, работу расширения, сжатия и полезную, количество подведенной и отведенной теплоты, термический к. п. д. цикла.

#### Циклы паротурбинных установок

Задача 8.5. Определить к.п.д. идеального цикла Ренкина при начальной температуре пара  $t = 500^\circ \text{C}$  и конечном давлении  $p_2 = 0,1$  бар. Задачу решить, когда: 1) начальное давление  $p_1 = 20$  бар; 2)  $p_1 = 50$  бар; 3)  $p_1 = 100$  бар.

Задача 8.6. Определить термический к.п.д. цикла Ренкина при начальном давлении пара  $p_1 = 40$  бар и начальной температуре  $t = 500^\circ \text{C}$ . Задачу решить, когда конечное давление  $p_2 = 2$  бар;  $p_2 = 0,5$  бар;  $p_2 = 0,05$  бар.

### Тема 9. Теплопроводность

Задача 9.1. Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена:

- из стали [ $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ],
- из бетона [ $\lambda = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ];
- из диатомитового кирпича [ $\lambda = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ].

Во всех трех случаях толщина стенки  $d = 50$  мм. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными  $t_{c1} = 100^\circ \text{C}$  и  $t_{c2} = 90^\circ \text{C}$ .

Задача 9.2. Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной  $d = 50$  мм  $q = 70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Определить разность температур на поверхностях стенки и численные значения градиента температуры в стенке, если она выполнена:

- из латуни [ $\lambda = 70 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ];
- из красного кирпича [ $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ];
- из пробки [ $\lambda = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ ].

Задача 9.3. Определить потери тепла через стенку длиной 5 м, высотой 3 м, толщиной  $d = 0,25$  м, если на поверхностях стенки поддерживаются температуры  $t_1 = +20^\circ \text{C}$ ,  $t_2 = -5^\circ \text{C}$ , коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ .

Задача 9.4. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $450 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{c1} = 450^\circ \text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{c2} = 50^\circ \text{C}$ . Определить толщину изоляции для двух случаев: а) изоляция выполнена из совелита, для которого  $\lambda = 0,09 + 0,0000874 \times t$ ; б) изоляция выполнена из асботермита, для которого  $\lambda = 0,109 + 0,000146 \times t$ .

Задача 9.5. Стенка неэкранированной топочной камеры парового котла выполнена из слоя пеношамота толщиной  $d_1 = 125$  мм и слоя красного кирпича толщиной  $d_2 = 500$  мм. Слои плотно прилегают друг к другу. Температура на внутренней поверхности камеры  $t_{c1} = 1100^\circ \text{C}$ , а на наружной  $t_{c3} = 50^\circ \text{C}$  (рис. 1). Коэффициент теплопроводности пеношамота  $\lambda_1 = 0,28 + 0,00023t$ , красного кирпича  $\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ .

Вычислить тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  стенки топочной камеры и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

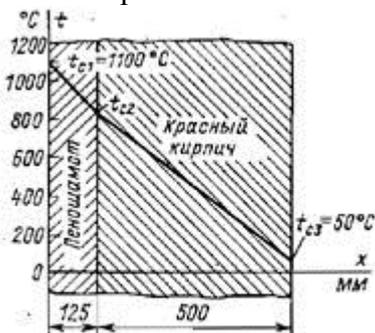


Рисунок 1 - Стенка неэкранированной топочной камеры парового котла

### Тема 10. Теплоотдача

Задача 10.1. Вычислить средний коэффициент теплоотдачи при течении трансформаторного масла в трубе диаметром  $d = 8$  мм и длиной  $l = 1$  м, если средняя по

длине трубы температура масла  $t_{ж} = 80^{\circ}\text{C}$ , средняя температура стенки трубки  $t_c = 20^{\circ}\text{C}$  и скорость масла  $\omega = 0,6 \text{ м/с}$

Задача 10.2. По трубке диаметром  $d=6 \text{ мм}$  движется вода со скоростью  $w=0,4 \text{ м/с}$ . Температура стенки трубки  $t_c=50^{\circ}\text{C}$ . Какую длину должна иметь трубка, чтобы при температуре воды на входе  $t_{ж1}=10^{\circ}\text{C}$  ее температура на выходе из трубки была  $t_{ж2}=20^{\circ}\text{C}$

Задача 10.3. Медный шинопровод кругл. сечения диаметром  $d=15\text{мм}$  охлаждается поперечным потоком сухого воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха равны соотв.  $w=1 \text{ м/с}$  и  $t_{ж}=20^{\circ}\text{C}$ . Вычислить коэффициент теплоотдачи от поверхности шинопровода к воздуху и допустимую силу тока в шинопроводе при условии, что температура его не должна превышать  $t_c=80^{\circ}\text{C}$ . Удельное электрическое сопротивление меди  $\gamma = 0.0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Задача 10.4. Цилиндрическая трубка диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  охлаждается поперечным потоком воды. Скорость потока  $w = 1 \text{ м/с}$ . Средняя температура воды  $t_{ж} = 10^{\circ}\text{C}$  и температура поверхности трубки  $t_{ст} = 50^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к охлаждающей воде.

Задача 10.5. Водяной калориметр, имеющий форму трубки с наружным диаметром  $d = 15 \text{ мм}$ , помещен в поперечный поток воздуха. Воздух имеет скорость  $w = 2 \text{ м/с}$ , направленную под углом  $90^{\circ}$  к оси калориметра, и среднюю температуру  $t_{ж} = 20^{\circ}\text{C}$ . При стационарном тепловом режиме на внешней поверхности калориметра устанавливается постоянная средняя температура  $t_{ст} = 80^{\circ}\text{C}$ . Вычислить коэффициент теплоотдачи от трубки к воздуху и тепловой поток на единицу длины калориметра.

## Тема 11. Тепловое излучение

Задача 11.1. Определить плотность солнечного лучистого потока, падающего на плоскость, нормальную к лучам Солнца и расположенную за пределами атмосферы Земли. Известно, что излучение солнца близко к излучению абсолютно черного тела с температурой  $t_0=5700^{\circ}\text{C}$ . Диаметр Солнца  $D = 1,391 \cdot 10^6 \text{ км}$ , расстояние Земли от Солнца  $l = 149,5 \cdot 10^6 \text{ км}$ .

Задача 11.2. Паропровод наружным диаметром  $d=200\text{мм}$  расположен в большом помещении с температурой воздуха  $t_{ж} = 30^{\circ}\text{C}$ . Температура поверхности паропровода  $t_{c1}=400^{\circ}\text{C}$ . Определить тепловые потери с единицы длины паропровода за счет излучения и конвекции. Степень черноты поверхности паропровода  $\varepsilon = 0,8$ . Температуру стен помещения можно принять равной температуре воздуха, т.е.  $t_{c2}=30^{\circ}\text{C}$ . Найти также соответствующие тепловые потери при температуре паропровода  $200^{\circ}\text{C}$

Задача 11.3. Обмуровка топочной камеры первого котла выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка – из листовой стали. Расстояние между обшивкой и кирпичной кладкой равна  $30 \text{ мм}$ , и можно считать его малым по сравнению с размерами стен топки. Вычислить потери теплоты в окружающую среду с единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности  $t_1=127^{\circ}\text{C}$ , а температура стальной обшивки  $t_2=50^{\circ}\text{C}$ . Степень черноты шамота  $\varepsilon_{ш} = 0,8$  и листовой стали  $\varepsilon_c = 0,6$ .

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

Лабораторные занятия позволяют интегрировать теоретические знания и формировать практические умения и навыки студентов в процессе учебной деятельности.

Задачи лабораторных занятий по дисциплине «Теплотехника»:

1. закрепление теоретического материала путем систематического контроля за самостоятельной работой студентов;
2. формирование умений использования теоретических знаний в процессе выполнения лабораторных работ;
3. развитие аналитического мышления путем обобщения результатов лабораторных работ;
4. формирование навыков оформления результатов лабораторных работ в виде таблиц, графиков, выводов.

#### **Структура лабораторного занятия**

1. Объявление темы, цели и задач занятия.
2. Проверка теоретической подготовки студентов к лабораторному занятию.
3. Выполнение лабораторной работы.
4. Подведение итогов занятия (формулирование выводов).
5. Проверка лабораторных тетрадей.

*Лабораторная работа № 1. Определение теплопроводности твердых материалов методом пластины.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Назовите способы передачи теплоты, укажите их основные особенности.
2. Поясните следующие понятия: температурное поле, изотермическая поверхность, градиент температуры.
3. Основной закон теплопроводности (закон Фурье).
4. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , его физический смысл.
5. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
6. Как изменяется наклон температурных зависимостей при одинаковом линейном масштабе, если значение теплопроводности  $\lambda$  возрастает?
7. Что называется термическим сопротивлением стенки, термической проводимостью стенки?
8. Приведите и поясните схему рабочего участка лабораторной установки.

*Лабораторная работа № 2. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Что такое конвективный теплообмен? От каких факторов зависит его интенсивность?
2. Режимы движения жидкости. Критические значения критерия Рейнольдса для вынужденного движения жидкости внутри трубы.
3. Закон теплоотдачи Ньютона.
4. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
5. Назовите критерии подобия для явления теплоотдачи. Какие безразмерные комплексы называются определяющими критериями подобия; какие определяемыми?
6. Как записывается критериальное уравнение для вынужденной конвекции? От чего зависят коэффициент и показатели степени?
7. Поясните понятие динамического и теплового пограничного слоя.
8. Чем объясняется изменение коэффициента теплоотдачи по мере удаления от входа на начальном участке трубы?

9. Как определяется скорость течения воздуха в трубе, как она влияет на интенсивность теплообмена?

*Лабораторная работа № 3. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Что называется естественной конвекцией и в чем заключается механизм ее возникновения?
2. Чему равна подъемная сила при естественной конвекции?
3. Что называется коэффициентом теплоотдачи? Каков его физический смысл?
4. Сформулируйте три теоремы подобия.
5. Чем отличаются определяемый и определяющий критерии подобия для естественной конвекции и в чем их физический смысл?
6. Что такое определяющая температура? Какая температура является определяющей для данного случая?
7. Назовите режимы теплообмена при естественной конвекции около горизонтальной поверхности; от каких параметров зависит переход от одного режима к другому; в чем заключается особенность механизма переноса тепла в каждом из режимов?
8. Каким образом определяется плотность теплового потока на данной установке?
9. Как изменяется локальный коэффициент теплоотдачи вдоль образующей поперечного сечения горизонтальной трубы при естественной конвекции? Почему?

*Лабораторная работа № 4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра в атмосфере различных газов.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Что называется свободной конвекцией и в чем заключается механизм ее возникновения?
2. Какое различие между свободной конвекцией в неограниченном и ограниченном пространстве?
3. Какие критерии подобия используются для исследования теплоотдачи при естественной конвекции?
4. Каким образом определяется плотность теплового потока на данной установке?
5. Приведите граничные (для определения режима движения) значения  $(Gr \cdot Pr)$  для естественной конвекции около вертикального цилиндра.
6. Как графически определяются показатель степени  $n$  и константа  $C$  в критериальной зависимости  $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ ?
7. Каков характер изменения локального коэффициента теплоотдачи вдоль вертикальной поверхности при свободной конвекции при различных режимах движения?
8. Какова роль газовой среды в процессе теплообмена при естественной конвекции?

*Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента излучения электропроводящего материала калориметрическим методом.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Лучистый теплообмен - это ... Виды излучений.
2. От чего зависит интенсивность излучения?
3. Особенности излучения твердых тел и газов.
4. Понятие абсолютно белого, абсолютно черного, абсолютно прозрачного тела.
5. Если вещество, например, обычное стекло, проницаемо, то оно проницаемо для

- всех длин волн черного излучения или нет?
6. Что такое эффективное излучение, спектральная плотность потока излучения?
  7. Какое излучение называется равновесным тепловым? Чему равен результирующий поток  $Q_{рез}$  в изолированной равновесной излучающей системе?
  8. Основные законы теплового излучения (закон Вина, закон Стефана-Больцмана, закон Кирхгофа).
  9. Как определить температуру удаленного абсолютно черного тела?
  10. Что такое степень черноты тела? Укажите возможные пределы значений коэффициента излучения и степени черноты серого тела.
  11. В чем сущность методов эффективного и многократного отражения, используемых для определения результирующего потока лучистого теплообмена?
  12. Поясните рабочую схему, для чего производят вакуумирование экспериментального участка?
  13. Поясните построенные по опытным данным графики зависимостей  $C_1 = f(T_1)$  и  $\varepsilon = f(T_1)$ .

*Лабораторная работа № 6. Исследование работы теплообменного аппарата.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Типы теплообменных аппаратов.
2. Классификация рекуперативных теплообменных аппаратов.
3. Виды теплового расчета теплообменников, основные расчетные уравнения, последовательность расчета.
4. От чего зависит коэффициент теплопередачи, его физический смысл.
5. Как изменяются температуры горячего и холодного теплоносителей по длине канала для прямотока и противотока? (зарисовать).
6. Какие преимущества имеет противоточная схема по сравнению с прямоточной?
7. Как влияет увеличение температуры горячего теплоносителя на входе на тепловую мощность аппарата и температуры теплоносителей на выходе?
8. Как влияет увеличение расхода холодного теплоносителя на тепловую мощность аппарата и температуры теплоносителей на выходе?
9. Пояснить схему рабочего участка и получившиеся результаты.

*Лабораторная работа № 7. Интенсификация работы теплообменного аппарата.*

Вопросы к лабораторной работе:

1. Почему истечение газа из сопла можно считать адиабатным?
2. Какие режимы истечения из сопла вам известны?
3. От каких параметров зависит  $\beta_k$ ?
4. От каких параметров зависит скорость истечения через сужающееся сопло в сверхкритической области истечения?
5. Измерение каких параметров производится в опыте?
6. Что надо сделать, чтобы увеличить расход газа при истечении через сужающееся сопло неизменной геометрии в сверхкритической области истечения?
7. С помощью какого устройства создается перепад давления в данной установке?
8. Как определяется действительная температура на выходе из сопла  $T_2$ ?
9. Как осуществляется переход с одного режима работы на другой?
10. Какие параметры влияют на значения коэффициента расхода сопла  $\mu_c$ ?

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа является одним из видов учебной деятельности обучающихся, способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений обучающихся;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности обучающихся: творческой инициативы, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развития исследовательских умений.

Этапы самостоятельной работы:

- осознание учебной задачи, которая решается с помощью данной самостоятельной работы;
- ознакомление с инструкцией о её выполнении;
- осуществление процесса выполнения работы;
- самоанализ, самоконтроль;
- проверка работ студента, выделение и разбор типичных преимуществ и ошибок.

Самостоятельная работа студентов является обязательным компонентом учебного процесса для каждого студента и определяется учебным планом.

##### **Методические рекомендации по изучению теоретических основ**

Изучение теоретической части дисциплины призвано не только углубить и закрепить знания, полученные на аудиторных занятиях, но и способствовать развитию у студентов творческих навыков, инициативы и организовать свое время.

Самостоятельная работа при изучении дисциплины включает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- знакомство с Интернет-источниками;
- подготовку к различным формам контроля (тесты, коллоквиумы);
- выполнение домашних заданий.

Планирование времени, необходимого на изучение дисциплин, студентам лучше всего осуществлять весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение материала.

Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно прорабатывать и дополнять сведениями из других источников литературы, представленных не только в программе дисциплины, но и в периодических изданиях.

При изучении дисциплины сначала необходимо по каждой теме прочитать рекомендованную литературу и составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме для освоения последующих тем курса. Для расширения знания по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы; проводить поиски в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем.

##### **Методические рекомендации по подготовке и сдаче экзамена.**

Экзамен это завершающий этап подготовки студента, механизм выявления и оценки результатов учебного процесса и установления соответствия уровня профессиональной

подготовки. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент должен ликвидировать имеющиеся пробелы в знаниях, систематизировать и упорядочить свои знания.

При подготовке к экзамену студентам целесообразно использовать материалы лекций, учебно-методические комплексы, основную и дополнительную литературу.

Формулировка вопросов экзаменационного билета совпадает с формулировкой перечня рекомендованных для подготовки вопросов экзамена, доведенного до сведения студентов накануне экзаменационной сессии.

При проработке той или иной темы курса сначала следует уделить внимание конспектам лекций, а уж затем учебникам, и другой печатной продукции. При подготовке необходимо тезисно записать ответы на наиболее трудные, с точки зрения студента, вопросы. Запись включает дополнительные (моторные) ресурсы памяти.

Представляется крайне важным посещение студентами проводимой перед экзаменом консультации. Здесь есть возможность задать вопросы преподавателю по тем разделам и темам, которые недостаточно или противоречиво освещены в учебной, научной литературе или вызывают затруднение в восприятии.

Важно, чтобы студент грамотно распределил время, отведенное для подготовки к экзамену. В этой связи целесообразно составить календарный план подготовки к экзамену, в котором в определенной последовательности отражается изучение или повторение всех экзаменационных вопросов. Подготовку к экзамену студент должен вести ритмично и систематично.

## 5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерофеев, В. Л. Теплотехника в 2 т. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена : учебник для бакалавриата и магистратуры / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов ; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 308 с. — (Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-01738-0. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/E0E1338F-8EAF-430A-B206-A8A45F61C0AC](http://www.biblio-online.ru/book/E0E1338F-8EAF-430A-B206-A8A45F61C0AC)
2. Ерофеев, В. Л. Теплотехника в 2 т. Том 2. Энергетическое использование теплоты : учебник для бакалавриата и магистратуры / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов ; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 198 с. — (Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-01850-9. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/652E53CB-3354-457F-B579-D52E501F0529](http://www.biblio-online.ru/book/652E53CB-3354-457F-B579-D52E501F0529).
3. Замалеев, З.Х. Основы гидравлики и теплотехники [Электронный ресурс] : учеб. пособие / З.Х. Замалеев, В.Н. Посохин, В.М. Чефанов. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2014. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/39146>. — Загл. с экрана.
4. Теплотехника [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Гдалев [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Научная книга, 2012. — 287 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/6350.html>
5. Теплотехника [Текст] : учеб. / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 326 с.
6. Основы термодинамики и теплотехники [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. - 2-е изд. - М. : ЛИБРОКОМ, 2009. - 224 с. :
7. Теплотехника. Практикум : учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / В. Л. Ерофеев [и др.] ; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 395 с. — (Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-6992-4. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/80112FD1-B0F6-4973-B2D8-D46B3E6C9BD1](http://www.biblio-online.ru/book/80112FD1-B0F6-4973-B2D8-D46B3E6C9BD1).
8. Круглов, Г.А. Теплотехника [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 208 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3900>. — Загл. с экрана.
9. Теплотехника [Текст] : Лабораторный практикум / М. В. Гриценко, А. В. Гриценко ; АмГУ, Эн. ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. - 132 с.
10. Общая энергетика [Текст] : учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ / Г. Ф. Быстрицкий . - М. : Академия, 2005. - 205 с.
11. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст] : Справочник: Рек. Гос. службой стандартных справ. данных. ГСССД Р-776-98 / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та. - [Б. м. : б. и.], 1999/2003. - 165 с. : табл.
12. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин. — М., 2008. — 469 с.
13. Теплотехника [Текст] : учебник: рек. Мин. обр. РФ / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер. - М. :Высш. шк., 1999. - 671 с.
14. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. — М. : Энергия, 1980. — 288 с.
15. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы [Текст] : справ. / Под общ.ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1999, 2000. - 528 с.