

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Цифровая энергетика»

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методические указания
к выполнению контрольных работ
по дисциплине «Тепломассообмен»
для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02

Курган 2023

Кафедра: «Цифровая энергетика».

Дисциплина: «Тепломассообмен».

Направления: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
13.03.02 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Составил: канд. техн. наук, доц. В. А. Савельев.

Утверждены на заседании кафедры «16» декабря 2022 г.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета «28» декабря 2022 г.

Методические указания и задание к контрольной работе

Контрольное задание должно выполняться студентом после изучения всего курса дисциплины. Студенту выдается индивидуальное задание, согласно которому он должен решить три задачи.

В каждой задаче исходные данные выбираются из соответствующих таблиц по последней и предпоследней цифре зачётной книжки студента. При выполнении задания необходимо соблюдать следующие требования:

1. На первой странице тетради привести в табличной форме исходные данные для решения каждой задачи согласно шифру – номеру зачетной книжки студента.

2. Обязательно перед решением записать условие задачи и содержание контрольного вопроса в тетрадь.

3. Решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором должно быть указано: какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу (из условия задачи, из учебника, задачника, определена ранее и т.д.).

4. Вычисления давать в развернутом виде.

5. Обязательно проставлять размерности всех заданных и рассчитанных величин в международной системе СИ.

6. Графический материал должен быть выполнен четко, в масштабе и на миллиметровой бумаге, как исключение можно использовать бумагу в клеточку.

7. При изучении настоящего курса следует пользоваться литературой, которая приведена в программе дисциплины. Решение типовых задач можно найти в учебниках и задачаниках.

При использовании таблиц, формул и других справочных материалов необходимо непосредственно при решении задачи указывать ссылку на литературный источник в квадратных скобках, например, [6].

8. После решения задачи должен быть произведен краткий анализ полученных результатов и сделаны соответствующие выводы.

В конце работы дать перечень использованной литературы, указать дату окончания работы и подписать ее.

ВВЕДЕНИЕ

Теплота занимает важное место в жизнедеятельности человека. Получение, преобразование и использование тепловой энергии возможно только при знании законов технической термодинамики.

Дисциплина «Тепломассообмен» знакомит студентов теплоэнергетиков и электромехаников с фундаментальными законами обмена тепловой энергией

между физическими телами, технологиями преобразования ими тепловой энергии, оборудованием и аппаратами, обеспечивающими тепломассообмен.

Теплопередача – наука, изучающая законы переноса, преобразования и использования тепловой энергии. Теоретической основой теплопередачи (тепломассообмена) является *молекулярная физика*. Дисциплина «Тепломассообмен» изучает законы взаимного обмена тепловой энергией между физическими телами, а также устройства и аппараты, осуществляющие этот теплообмен.

Студенту предлагается самостоятельно проработать материал разделов и тем изучаемой дисциплины, указанный в предлагаемом перечне и пояснениях по изучению дисциплины (таблицы 1–3), а затем решить задачи по темам курса: расчёт теплопередачи при конвективном и лучистом теплообмене.

Таблица 1 – Изучаемые разделы и темы

ШИФР РАЗДЕЛА, ТЕМЫ	НАИМЕНОВАНИЕ РАЗДЕЛА, ТЕМЫ ДИСЦИПЛИНЫ
ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА	
1	Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты. Теплопроводность, конвекция и излучение. Сложный теплообмен. Значение теплообмена в промышленных процессах
2	Теплопроводность. Основные положения учения о теплопроводности. Температурное поле и температурный градиент, тепловой поток. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности для процессов теплопроводности. Теплопроводность плоской, многослойной и цилиндрической стенок
3	Конвективный теплообмен. Основные положения и определения. Физическая сущность конвективного теплообмена. Закон конвективного теплообмена Ньютона – Рихмана, коэффициент теплоотдачи. Критериальные уравнения конвективного теплообмена. Критерии Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа, Прандля. Понятие гидродинамического и теплового пограничных слоев. Теплоотдача при вынужденном и свободном движении жидкости. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном пограничном слое
4	Теплообмен излучением, основные законы теплового излучения. Виды лучистых потоков. Теплообмен излучением в системе тел. Защита от излучения, экраны. Излучение газов; лучистый теплообмен в топках и камерах сгорания
5	Основы расчёта теплопередачи. Коэффициент теплопередачи. Теплопередача через плоскую, многослойную, цилиндрическую стенку. Пути интенсификации процесса теплопередачи. Критический диаметр тепловой изоляции. Выбор целесообразного материала тепловой изоляции
6	Типы теплообменных аппаратов (ТА): рекуперативные, регенеративные и смешительные. Расчетные уравнения и схемы движения жидкости в ТА. Определение температурных напоров. Основы расчета теплообменных аппаратов
7	Теплообмен при изменении агрегатного состояния. Теплообмен при конденсации. Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при кипении, механизм процессов теплообмена при пузырьковом и пленочном режимах кипения. Основные режимы кипения. Кривая кипения. Частота и скорость роста паровых пузырей

Таблица 2 – Основная литература

№ п/п	Наименование	Используется при изучении разделов, тем
1	Теплотехника : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Энергомашиностроение» / А. М. Архаров, И. А. Архаров, В. Н. Афанасьева [и др.] ; под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – Москва : Издательство МГТУ, 2004. – 711 с.	1–7
2	Кудинов В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – Москва : Высшая школа, 2003.	1–7
3	Теплотехника / под ред. А. П. Баскакова. – Москва : Энергоиздат, 1991.	1–7

Таблица 3 – Дополнительная литература

№ п/п	Наименование	Используется при изучении разделов, тем
1	Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. – Москва : Высшая школа, 1981.	1–7
2	Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1980.	1–7
3	Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – Москва : Машиностроение, 1973. – 344 с.	1–7
4	Теплотехника / В. Н. Луканин, М. П. Шатров, В. П. Кемпфер [и др.]. – Москва : Высшая школа, 2004.	1–7

ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Основные понятия и определения

Предмет и задачи теории теплообмена. Значение теплообмена в промышленных процессах. Виды переноса теплоты. Теплопроводность, конвекция и излучение. Сложный теплообмен.

Теплопроводность

1. Основные положения учения о теплопроводности. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Механизм передачи теплоты в металлах, диэлектриках, полупроводниках, жидкостях и газах. Дифференциальное уравнение теплопроводности для однородных изотропных тел; условия однозначности. Коэффициент температуропроводности.

2. Теплопроводность при стационарном режиме. Теплопроводность однослойной и многослойной плоской и цилиндрической стенки при граничных условиях *I* рода. Теплопроводность сферической стенки. Теплопроводность при стационарном режиме и граничных условиях *III* рода (теплопередача). Теплопередача через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки; коэффициент теплопередачи. Пути интенсификации процесса теплопередачи. Критический диаметр тепловой изоляции. Выбор целесообразного материала тепловой изоляции.

3. Нестационарный процесс теплопроводности. Методы решения задач нестационарной теплопроводности. Охлаждение (нагревание) неограниченной пластины. Граничные условия *I*, *II* и *III* рода. Регулярный режим охлаждения (нагрева) тел. Теплопроводность тела с внутренними источниками теплоты. Основы расчета задач теплопроводности на ЭВМ.

Методические указания

Рассматривая теплопроводность элементарных тел (пластинка, труба, шар), студент должен уметь применить закон Фурье для каждого случая, т. е. вывести уравнения, определяющие закон распределения температур по толщине стенки и количество теплоты, передаваемой через стенку. При изучении процесса теплопередачи через стенку уметь анализировать влияние отдельных термических сопротивлений на общее сопротивление, а также знать способы уменьшения термических сопротивлений. В нестационарной теплопроводности обратить внимание на решение конкретных задач с помощью критериев Bi и Fo , твердо усвоив их физический смысл и влияние на протекание процессов нагрева или охлаждения.

Вопросы для самопроверки: 1. Как передается теплота в процессе теплопроводности? 2. Сформулируйте основной закон теплопроводности.

3. Каков закон распределения температуры по толщине плоской и цилиндрической стенок? 4. При каком условии расчет цилиндрической стенки можно заменить расчетом плоской стенки? 5. Всегда ли с увеличением толщины изоляции цилиндрической трубы тепловой поток через нее уменьшается? По какому условию выбирается изоляция трубы? 6. Какова методика расчета нагрева и охлаждения простейших тел с помощью критериев Био и Фурье?

Конвективный теплообмен

1. Основные положения учения о конвективном теплообмене. Физическая сущность конвективного теплообмена. Уравнение Ньютона – Рихмана. Дифференциальные уравнения теплообмена; уравнение движения вязкой жидкости, уравнение теплопроводности для потока движущейся жидкости, уравнение теплоотдачи на границе потока и стенки, уравнение закона сохранения массы. Условия однозначности к дифференциальным уравнениям конвективного теплообмена. Основные положения теории пограничного слоя. Местный и средний коэффициенты теплоотдачи.

2. Основы теории подобия и моделирования. Основные определения. Условия подобия физических явлений. Теоремы подобия. Критериальные уравнения, определяющие критерии. Метод моделирования. Физический смысл основных критериев подобия. Анализ размерностей. Понятие о математическом моделировании.

3. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости. Теплообмен при движении жидкости вдоль плоской поверхности; теплоотдача при ламинарном и турбулентном пограничном слое; расчетные уравнения. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах; теплоотдача при ламинарном и турбулентном течениях жидкости в гладких и шероховатых, прямых и изогнутых трубах, круглого и некруглого сечения. Расчетные уравнения. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб коридорно и шахматно расположенных. Расчетные уравнения.

4. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Теплоотдача при свободном движении жидкости в неограниченном объеме; ламинарная и турбулентная конвекция у вертикальных поверхностей. Естественная конвекция у горизонтальных труб. Расчетные уравнения.

5. Теплообмен при изменении агрегатного состояния. Теплообмен при конденсации. Пленочная и капельная конденсации. Теплоотдача при конденсации чистых паров. Решение Нуссельта. Расчетные уравнения коэффициента теплоотдачи для вертикальных и горизонтальных труб. Влияние на теплообмен при конденсации присутствующих в паре неконденсирующихся газов.

б. Теплообмен при кипении; механизм процессов теплообмена при пузырьковом и пленочном режимах кипения. Кризисы кипения. Теплоотдача при пузырьковом и пленочном кипении жидкости в большом объеме. Расчетные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи.

Методические указания

Наиболее труден для исследования конвективный теплообмен. Действительно, для расчета передачи теплоты конвекцией необходимо знать числовые значения коэффициента теплоотдачи α для каждого конкретного случая, но α не является физической константой, так как этот коэффициент характеризует не отдельное тело, а тепловое взаимодействие двух тел: жидкости (или газа) и твердого тела. Поэтому α зависит от большого количества факторов. Система уравнений, определяющая конвективный теплообмен и, следовательно, позволяющая (в принципе) определить α , может быть решена только для ограниченного числа простейших случаев и то с определенными допущениями. Получение числовых значений α из эксперимента на натуре экономически нецелесообразно: необходимо провести громадное количество опытов, чтобы выяснить влияние каждого из действующих факторов, причем мы получим ответ лишь для частного случая исследуемого объекта. Дело осложняется еще тем, что различные величины, от которых зависит α , часто связаны между собой; например, при изменении температуры меняется вязкость, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и др. Выход из положения дает теория подобия. Она, во-первых, дает возможность проводить эксперименты не на натуре, а на модели, и результаты опытов на модели распространить на все подобные явления; во-вторых, основываясь на системе дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, она четко определяет условия подобия физических явлений и процессов. Обработка экспериментальных данных в критериальной форме позволяет выявить главные факторы, влияющие на величину α , и отбросить второстепенные. Рассматривая, например, вынужденное движение жидкости в трубе и считая температуру жидкости и стенки трубы различными, можно определить тепловой поток между ними. Для этого необходимо знать коэффициент теплоотдачи α . Желательно иметь данные по параметрам выбранной трубы, рода жидкости, ее скорости и других условий. Это оказывается возможным с помощью теории подобия. Определяемый критерий Нуссельта Nu , в который входит α ($Nu = \alpha l / \lambda$), при вынужденном движении жидкости зависит в основном от двух параметров: критерия Рейнольдса $Re = \omega l / \nu$, определяющего характер движения жидкости, и критерия Прандтля $Pr = \nu / \alpha$, определяющего физические свойства жидкости. Следовательно, $Nu = f(Re, Pr)$. Замеряя величины, входящие в критерии, из серии опытов получим таблицы, определяющие величину

Nu , и, следовательно, α в зависимости от значений Re и Pr . Результаты эти обычно представляют приближенно в виде степенной функций $Nu = cRe^m Pr^n$.

По формулам такого типа обычно и рассчитывают коэффициент теплоотдачи α . Студент должен четко уяснить физический смысл основных критериев (Рейнольдса, Прандтля, Грасгофа, Нуссельта), применять при расчетах те критериальные зависимости, которые соответствуют конкретному виду задачи. Переходя к изучению отдельных видов теплообмена, а также конкретных задач, необходимо внимательно изучить те предположения и допущения, на базе которых строится их решение. Поэтому одной из основных задач студента при изучении этой темы является четкое усвоение ответов на следующие вопросы:

1. Каким образом (с помощью каких исходных аналитических зависимостей) находятся определяющие критерии?
2. Какой критериальной зависимостью следует воспользоваться для конкретного случая расчета коэффициента теплоотдачи α ? (предварительно определив характер движения – ламинарный или турбулентный и природу его возникновения – свободное или вынужденное.)
3. Каковы определяющий размер и определяющая температура? (За определяющую температуру при экспериментах рекомендуется выбирать температуру поверхности стенки, или среднюю температуру жидкости и стенки. выбор той или иной температуры указывается соответствующим индексом в формуле).
4. Находятся ли параметры задачи в интервале значений критериев, для которого справедлива выбранная формула?

Вопросы для самопроверки.

1. Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией.
2. Какой критерий характеризует вынужденную конвекцию?
3. Из каких уравнений выводятся критерии Re , Gr , Pz и Nu ?
4. Какой критерий характеризует свободную конвекцию?
5. Что характеризует критерий Нуссельта?
6. Что такое определяющая температура и определяющий размер?
7. Почему при обтекании стенки жидкостью в непосредственной близости от поверхности стенки температурный градиент резко увеличивается?
8. В чем особенности теплоотдачи при кипении воды и конденсации водяного пара? Какие режимы кипения вам известны?

Теплообмен излучением

Общие понятия и определения. Частоты теплового излучения, баланс лучистого теплообмена. Основные законы лучистого теплообмена. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой; коэффициент облученности: теплообмен излучением между телами, произвольно расположенными в пространстве. Защита от излучения. Излучение газов; лучистый теплообмен в топках и камерах сгорания.

Методические указания

При изучении этой темы студент должен прежде всего уяснить принципиальное отличие теплообмена излучением от теплообмена теплопроводностью и конвекцией. В процессе теплообмена излучением осуществляется двойное превращение энергии – сначала тепловой энергии в энергию электромагнитного излучения, а затем энергии электромагнитного излучения в тепловую энергию. Поскольку тела поглощают лишь часть энергии электромагнитного излучения (частично отражая или пропуская ее через себя), основным вопросом при исследовании теплообмена излучением является вопрос о количественном соотношении между отраженной, поглощенной и пропущенной через тело энергиями. Действительно, при защите объектов от лучистой энергии на пути распространения ее нужно ставить экраны, максимально отражающие лучистую энергию. Наоборот, при необходимости получения максимального количества тепловой энергии за счет лучистой нужно телу, воспринимающему лучистую энергию, придать такие свойства, чтобы оно поглощало максимум ее (покрытие поверхности тела краской, шероховатость поверхности тела). И наконец, если требуется, чтобы максимум лучистой энергии пропускался через твердую стенку (например, свет), то выбирается стенка с соответствующими свойствами. Основные законы излучения и экспериментальные данные свойств отдельных тел позволяют решать конкретные задачи, связанные с лучистым теплообменом. Поэтому студенту необходимо четко усвоить законы Планка, Вина, Кирхгофа, Стефана – Больцмана, методику и границы их применения. Так как в практике, как правило, участвуют все виды теплообмена (теплопроводность, конвекция и излучение) совместно, то студент при решении тех или иных задач должен достаточно четко представлять себе:

- а) все ли виды теплообмена имеются в рассматриваемом случае,
- б) какой из видов теплообмена является преобладающим по сравнению с другими,
- в) можно ли пренебречь каким-либо видом теплообмена с целью упрощения решения задачи (без больших погрешностей).

Вопросы для самопроверки. **1.** Какие длины волн ограничивают видимые и какие – тепловые лучи? **2.** Что происходит с лучистой энергией, падающей на поверхность твердого тела? Что такое абсолютно черное, абсолютно белое и диатермическое тело? **3.** Что графически изображает закон Планка? Можно ли и как на этом графике показать излучательную способность тела? **4.** Сформулируйте закон смещения Вина и объясните его связь с законом Планка. **5.** О чем говорит закон Кирхгофа и каково его практическое применение? **6.** Сформулируйте закон Стефана – Больцмана и объясните его связь с законом Планка. **7.** Дайте определение абсолютно черного и серого тел, поглощательной

способности и степени черноты. **8.** Докажите, что коэффициент поглощения серого тела равен его степени (коэффициенту) черноты. **9.** Что такое «эффективное излучение»? Чем оно отличается от собственного излучения? **10.** Для чего нужны экраны и какими свойствами они должны обладать? **11.** Как определяется лучистый поток между параллельными плоскими стейками и для тела, находящегося внутри другого полого тела? **12.** Что такое сплошной и селективный спектры излучения? У каких тел они наблюдаются? **13.** Каковы особенности излучения газов? **14.** Какие газы можно считать прозрачными для тепловых лучей? **15.** Как определяется степень (коэффициент) черноты газовой среды?

Теплопередача. Основы расчета теплообменных аппаратов

Теплопередача в теплообменниках. Основные схемы движения и теплообмена потоков теплоносителей. Теплоносители, их основные характеристики. Требования, предъявляемые к теплоносителям. Уравнения для теплового потока и средней разности температур любой схемы теплообмена; сложный теплообмен. Методы интенсификации теплопередачи. Назначение, классификация и схемы теплообменных аппаратов. Принцип расчета теплообменных аппаратов. Конструктивный и поверочный тепловые расчеты теплообменных аппаратов. Основы гидродинамического расчета теплообменных аппаратов. Применение ЭВМ для решения задач, расчета, моделирования и оптимизации процессов теплообмена.

Методические указания

При изучении этой темы студент должен обратить внимание на способы интенсификации теплообмена в теплообменниках, уметь анализировать влияние на коэффициент теплопередачи различных факторов и определять решающие из них. Усвоить методику вывода формулы среднего температурного напора для рекуперативных теплообменников, знать ограничения, допущенные при выводе ее, уметь рассчитывать теплообменники при различных схемах движения теплоносителей (противоток и прямоток), а также анализировать полученные результаты.

Вопросы для самопроверки. **1.** Чем отличается теплопередача от теплоотдачи? **2.** Как по графику $t = f(R)$, где R – термическое сопротивление, определить температуру стенок? **3.** При $\alpha_1 \gg \alpha_2$ какой из коэффициентов теплоотдачи следует увеличить для увеличения коэффициента теплопередачи K ? **4.** Какие виды теплообменных аппаратов вы знаете? **5.** Где применяют рекуперативные теплообменники? **6.** На основе каких исходных уравнений построено определение поверхности рекуперативных теплообменников? **7.** При каких предположениях выводятся формулы, определяющие среднелогарифмический температурный напор? **8.** Когда среднелогарифмический температурный напор можно за-

менить среднеарифметическим? 9. Какие преимущества имеет противоточная схема теплообменника перед прямоточной? В каких случаях эти схемы эквивалентны?

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. По горизонтально расположенной стальной трубе $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ со скоростью ω течет вода, имеющая температуру $t_{\text{в}}$. Снаружи труба охлаждается окружающим воздухом, температура которого $t_{\text{воз}}$, давление 0,1 МПа. Определить коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 соответственно от воды к стенке трубы и от стенки трубы к воздуху; коэффициент теплопередачи и тепловой поток q_1 , отнесенный к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр трубы равен d_1 , внешний – d_2 . Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 15.

Указание. Для определения α_2 принять в первом приближении температуру наружной поверхности трубы t_2 равной температуре воды.

Таблица 4 – Исходные данные к задаче 1

Последняя цифра шифра	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$10 \cdot \omega, \text{ м/с}$	Предпоследняя цифра шифра	$t_{\text{воз}}, ^\circ\text{C}$	$d_1, \text{ мм}$	$d_2, \text{ мм}$
0	120	2,5	0	18	190	210
1	130	3,6	1	16	180	200
2	140	2,7	2	14	170	190
3	150	3,8	3	12	160	180
4	160	1,9	4	10	150	170
5	170	2,1	5	8	140	160
6	180	2,3	6	6	130	150
7	200	4,2	7	4	120	140
8	210	4,3	8	2	110	130
9	220	4,4	9	0	100	120

Ответить на вопросы. Какой режим течения внутри трубы в вашем варианте задачи? Какой режим движения окружающего трубу воздуха? Почему можно при расчете принять равенство температур $t_2 \cong t_{\text{в}}$?

Указание. При определении коэффициента теплоотдачи использовать таблицу 4 приложения.

Пример решения задачи 1

Таблица 5 – Исходные данные для решения примера

Последняя цифра шифра	$t_6, ^\circ\text{C}$	$10 \cdot \omega, \text{м/с}$	Предпоследняя цифра шифра	$t_{603}, ^\circ\text{C}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$
8	210	4,3	8	2	110	130
9	220	4,4	9	0	100	120

Ответить на вопросы: Какой режим течения внутри трубы в вашем варианте задачи? Какой режим движения окружающего трубу воздуха? Почему можно при расчете принять равенство температур $t_2 \cong t_B$?

Решение:

Потери теплоты можно определить по формуле:

$$q_l = k_l \pi (t_1 - t_2),$$

где $k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}$ – коэффициент теплопередачи,

$\alpha_1 = \frac{Nu \lambda}{d_1}$ – коэффициент теплоотдачи,

$Nu = f(Re, Gr, Pr)$ – число Нуссельта.

Определим режим течения воды внутри трубы по числу Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_1}{\nu} = \frac{0,44 \cdot 0,11}{\nu} = \frac{0,44 \cdot 0,11}{0,000942} = 51,38$$

$$\nu = \frac{0,01775}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} = \frac{0,01775}{1 + 0,0337 \cdot 220 + 0,000221 \cdot 220^2} = 0,000942 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Режим турбулентный:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} = 753, \quad Pr = 0,89$$

$$\alpha_1 = Nu \cdot \lambda / 0,11 = \frac{753 \cdot 64,5}{0,11 \cdot 100} = 4415 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Определим коэффициент α_2 , принимая $t_c = t_{\text{H}_2\text{O}}$

При свободной конвекции:

$$Nu_B = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

Для воздуха $Nu_{ж} = 0,47 \cdot Gr_{ж}^{0,25}$

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu_{ж}^2} = \frac{9,81 \cdot 1 \cdot 0,13^3 \cdot 218}{(273 + 2) \cdot (13,28 \cdot 10^{-6})^2} = 96878345,67$$

$$Nu_{ж} = 0,47 \cdot 96878345,67^{0,25} = 46,6$$

$$\alpha_2 = \frac{46,6 \cdot 2,5}{0,13 \cdot 100} = 8,96 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

$$\text{Определяем } K = \frac{1}{\frac{1}{4415 \cdot 0,11} + \frac{1}{2 \cdot 30} \ln \frac{130}{110} + \frac{1}{8,96 \cdot 0,13}} = \frac{1}{0,002 + 0,0028 + 0,858} = 1,159 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$$

Определим потери теплоты:

$$q_l = K \cdot \pi \cdot (220 - 2) = 1,159 \cdot 3,14 \cdot 218 = 793,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Какой режим движения окружающего трубу воздуха?

Воздух, окружающий трубу, по законам конвекции движется снизу вверх: нагретый около трубы воздух, имеющий меньшую плотность, поднимается вверх, и его место занимает холодный воздух, имеющий большую плотность, который опускается вниз.

Почему можно при расчете принять равенство температур $t_2 \cong t_B$?

Принять равенство температур $t_2 \cong t_B$ можно в связи с высокой теплопроводностью стали. На практике температуры наружной и внутренней стенок стальных труб различаются незначительно.

Задача 2. Определить потери теплоты в единицу времени с 1 м длины горизонтально расположенной цилиндрической трубы, охлаждаемой свободным потоком воздуха, если температура стенки трубы t_c , температура воздуха в помещении t_B , а диаметр трубы d . Степень черноты трубы $\varepsilon_c = 0,9$. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 6.

Таблица 6 – Исходные данные к задаче 2

Последняя цифра шифра	d, мм	Предпоследняя цифра шифра	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	d, мм	Предпоследняя цифра шифра	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$
0	220	0	150	15	5	270	5	100	20
1	230	1	140	20	6	300	6	190	15
2	210	2	130	25	7	320	7	180	10
3	240	3	120	35	8	340	8	170	5
4	250	4	110	25	9	360	9	160	0

Указание. Для определения коэффициента теплоотдачи α воспользоваться таблицей приложения.

Пример решения задачи 2

Таблица 7 – Исходные данные для решения примера

Последняя цифра шифра	d, мм	Предпоследняя цифра шифра	t _с , °С	t _в , °С
8	340	8	170	5
9	360	9	160	0

Решение:

Тепловой поток определим по формуле:

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_{ж}) \cdot F,$$

где $F = 2\pi r l = \pi d l$ – поверхность теплообмена, м²;

$t_{ж}$ – температура окружающей среды, °С;

α – коэффициент теплоотдачи.

Следовательно, $q = \alpha \cdot (t_c - t_{ж}) \cdot \pi d l$

$$q_l = \alpha \cdot (t_c - t_{ж}) \cdot \pi d$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{и}$$

Определение коэффициента излучения $\alpha_{и}$

$$\alpha_{и} = \frac{q_{и}}{(t_c - t_{ж})}$$

$$q_{и} = \alpha_{и} \cdot (t_c - t_{ж})$$

$$q_{и} = \varepsilon_c \cdot C_0 \left(\frac{T_c}{100} \right)^4,$$

где $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$$q_{и} = 0,9 \cdot 5,67 \left(\frac{T_c}{100} \right)^4$$

$$T_c = t + 273 = 170 + 273 = 443 \text{ К}$$

$$q_{и} = 0,9 \cdot 5,67 \left(\frac{443}{100} \right)^4 = 0,9 \cdot 5,67 \cdot 385,14 = 1965,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\alpha_{и} = \frac{q_{и}}{(t_c - t_{ж})} = \frac{1965,35}{(170 - 5)} = 11,9 \approx 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{°С}}.$$

Определение коэффициента конвекции α_k .

Теплоотдача горизонтальной трубы при свободной конвекции определяется зависимостью (число Нуссельта):

$$Nu = 0,5 \cdot (G_{rж} \cdot P_{rж})^{0,25} \cdot \left(\frac{P_{rж}}{P_{rc}} \right)^{0,25}$$

Для воздуха, когда критерий Прандтля изменяется незначительно $Pr \approx 0,7$, расчет можно производить по формуле:

$$Nu = 0,47 \cdot G_{r_{ж}}^{0,25},$$

Где $G_{r_{ж}}$ – число Грасгофа.

$$G_{r_{ж}} = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu_{ж}^2} = \frac{9,81 \cdot 1 \cdot 0,36^3 \cdot 165}{278 \cdot (13,72 \cdot 10^{-6})^2} = 1443136580$$

где $g = 9,81 \text{ М/с}^2$ – ускорение свободного падения,

$$\beta = \frac{1}{t_{ж} + 273} \text{ – коэффициент объемного расширения воздуха, } 1/\text{К}$$

при $t_{в} = 5 \text{ }^\circ\text{С}$.

$\nu_{ж} = 13,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематический коэффициент вязкости.

$$G_{r_{ж}}^{0,25} = 194,9$$

$$Nu = 0,47 \cdot 194,9 = 91,6$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

Следовательно, коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху:

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda}{d}$$

где $\lambda = 2,55 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{С}}$ – коэффициент теплопроводности.

$$\alpha_k = \frac{91,6 \cdot 2,55 \cdot 10^{-2}}{0,36} = 6,49 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ }^\circ\text{С}}$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{и} = 6,49 + 12 = 18,49 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ }^\circ\text{С}}$$

$$q_l = 18,49 \cdot (170 - 5) \cdot 3,14 \cdot 0,36 = 3448,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Задача 3. Определить удельный лучистый тепловой поток q (в ваттах на квадратный метр) между двумя параллельно расположенными плоскими стенками, имеющими температуру t_1 и t_2 и степени (коэффициенты) черноты ε_1 и ε_2 , если между ними нет экрана. Определить q при наличии экрана со степенью (коэффициентом) черноты ε_3 (с обеих сторон). Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 8.

Таблица 8 – Исходные данные к задаче 3

Последняя цифра шифра	ε_1	ε_2	ε_3	Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
0	0,5	0,6	0,04	0	200	30
1	0,55	0,52	0,045	1	250	35
2	0,6	0,7	0,05	2	300	25
3	0,52	0,72	0,02	3	350	20
4	0,58	0,74	0,03	4	400	40
5	0,62	0,54	0,025	5	450	45
6	0,7	0,58	0,032	6	500	50
7	0,65	0,62	0,055	7	550	55
8	0,75	0,73	0,06	8	600	60
9	0,8	0,77	0,023	9	650	65

Пример решения задачи 3

Таблица 9 – Исходные данные для решения примера

Последняя цифра шифра	ε_1	ε_2	ε_3	Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
8	0,75	0,73	0,06	8	600	60
9	0,8	0,77	0,023	9	650	65

Решение:

Определим удельный лучистый тепловой поток между двумя параллельно расположенными плоскими стенками без экрана:

$$q_{12} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

где $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,77} - 1} = \frac{1}{1,25 + 1,3 - 1} = 0,645$$
 – приведенная степень черноты

поверхностей пластин;

$T_1 = 273 + t_1 = 273 + 600 = 873 \text{ K}$ – температура поверхности 1 пластины;

$T_2 = 273 + t_2 = 273 + 60 = 333 \text{ K}$ – температура поверхности 2 пластины.

$$q_{12} = 0,645 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{873}{100} \right)^4 - \left(\frac{333}{100} \right)^4 \right] = 0,645 \cdot 5,67 \cdot [5808,4 - 123] =$$

$$= 20792 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Определим удельный лучистый тепловой поток между двумя параллельно расположенными плоскими стенками с экраном:

$$q_{\text{э}} = q_{12} \cdot \frac{1}{1 + \varepsilon_{\text{пр}} \left(\frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right)} = 20792 \cdot \frac{1}{1 + 0,645 \cdot \left(\frac{2}{0,023} - 1 \right)} = \frac{20792}{56,44} = 368,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

С экраном теплопередача уменьшилась в $\frac{20792}{368,4} = 56,4$ раза.

Вопросы к экзамену

1. Теплообмен. Виды переноса теплоты. Основные понятия и определения.
2. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Градиент температуры. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условие однозначности.
3. Теплопроводность однослойной и многослойной плоской стенок.
4. Теплопроводность однослойной и многослойной цилиндрической стенки.
5. Конвективный теплообмен. Особенности движения жидкостей и газов. Свободная и вынужденная конвекция. Уравнение Ньютона – Рихмана. Коэффициент теплоотдачи.
6. Основы теории подобия. Критериальные уравнения. Физический смысл основных критериев подобия.
7. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.
8. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы.
9. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Расчёт коэффициента теплоотдачи.
10. Теплообмен излучением. Общие понятия и определения. Основные законы теплового излучения.
11. Теплообмен излучением между телами, разделёнными прозрачной средой.
12. Влияние экранов на излучение.
13. Излучение и поглощение в газах.
14. Теплообмен при кипении и конденсации.
15. Теплопередача. Коэффициент теплопередачи. Сложный теплообмен.

16. Теплопередача при движении теплоносителей через цилиндрическую стенку.
17. Теплообменные аппараты. Классификация теплообменных аппаратов.
18. Основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках.
19. Уравнение теплового баланса и теплопередачи. Температурный напор.
20. Основы теплового расчёта теплообменных аппаратов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная учебная литература

1 Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники : учеб. пособие для вузов / В. И. Ляшков. – Москва : Абрис, 2012.

Дополнительная учебная литература

2 Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен учебник для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2011.

3 Барилевич В. А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена : учебное пособие / В. А. Барилевич, Ю. А. Смирнов. – Москва : НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 432 с.

Таблица 1 – Мольные теплоемкости газов кДж/(моль·К)

Газы	μC_V	μC_p
Одноатомные	12,5	20,8
Двухатомные	20,8	29,1
Трех- и многоатомные	29,1	37,4

Таблица 2 – Средние изобарные мольные теплоемкости некоторых газов кДж/(кмоль·К)

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух	Кислород O_2	Азот N_2	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Окись углерода CO	Углекислый газ CO_2
0	29,073	29,274	29,115	28,617	33,499	29,123	35,860
100	29,153	29,538	29,144	29,935	33,741	29,178	38,112
200	29,299	29,931	29,228	29,073	34,188	29,303	40,059
300	29,521	30,400	29,383	29,123	34,575	29,517	41,755
400	29,789	30,878	29,601	29,186	35,090	29,789	43,250
500	30,095	31,334	29,864	29,249	35,630	30,099	44,573
600	30,405	31,761	30,149	29,316	36,195	30,426	45,758
700	30,723	32,150	30,451	29,408	36,789	30,752	46,813
800	31,028	32,502	30,748	29,517	37,392	31,070	47,763
900	31,321	32,825	31,037	29,647	38,008	31,376	48,617
1000	31,598	33,118	31,313	29,789	38,619	31,665	49,392
1200	32,109	33,633	31,828	30,107	39,825	32,192	50,740
1400	32,565	34,076	32,293	30,467	40,976	32,653	51,858
1600	32,967	34,474	32,699	30,832	42,056	33,051	52,800
1800	33,319	34,834	33,055	31,192	43,070	33,402	53,604
2000	33,641	35,169	33,373	31,548	43,995	33,708	54,290
2200	33,296	35,483	33,658	31,891	44,853	33,980	54,881
2400	34,185	35,785	33,909	32,222	45,645	34,223	55,391

Таблица 3 – Физические параметры сухого воздуха при давлении 101,3 кПа

$t, ^\circ\text{C}$	$10^2 \cdot \lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$10^6 \cdot \nu, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	2,44	13,28	0,707
100	3,21	23,13	0,688
200	3,94	34,85	0,680
300	4,60	48,33	0,674
400	5,21	63,09	0,678
500	5,75	79,38	0,687
600	6,23	96,89	0,699
700	6,71	115,4	0,706
800	7,19	134,8	0,713
900	7,64	155,1	0,717
1000	8,08	177,1	0,719

Савельев Виктор Андреевич

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методические указания
к выполнению контрольных работ
по дисциплине «Тепломассообмен»
для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02

Редактор В. С. Никифорова

Подписано в печать 03.07.2023	Формат 60×84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,375	Уч.-изд. л. 1,375
Заказ 36	Тираж 25	

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.