

ФГБОУ ВО
«Удмуртский государственный университет»
Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практических работ
по дисциплине "Термодинамика и теплопередача"
Раздел «Теплопередача»

Ижевск
2020

Составитель: д.т.н., профессор кафедры РЭНГМ С.С. Макаров

Методические указания включают программу курса «Теплопередача», исходные данные по вариантам заданий, вопросы для самоконтроля, необходимый справочный материал, примеры и рекомендации по выполнению практических работ.

Общие указания

При изучении курса «Теплопередача» обучающиеся руководствуясь программой курса, работают с использованием учебников и учебных пособий, выполняют практические работы.

Практические работы должны быть аккуратно оформлены в отдельных тетрадях или на листах формата А4, на обложке обязательно следует указать информацию о студенте и учебном заведении. Решение задач начинается с подробного изложения содержания задачи без сокращений, выделив исходные данные, соответствующие заданному варианту.

При выполнении практических заданий необходимо соблюдать следующие условия: решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется, и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (из условия задачи, из справочника или были определены выше и т.д.). Вычисления проводить в единицах СИ и показывать ход решения.

Всегда, если это возможно, нужно осуществлять контроль своих действий и оценивать достоверность полученных численных результатов.

Обязательно также ответить на вопросы, предложенные для проверки усвоения материала. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

ПРОГРАММА РАЗДЕЛА «ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Тема 1. Основные понятия и определения

Предмет и основные задачи «Теплопередача». Место этой дисциплины в подготовке инженера. Основные понятия и определения. Виды распространения теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Сложный теплообмен. Понятие о массообмене.

Методические указания

При изучении термодинамики студент не получал никаких указаний на то, какой механизм отвода теплоты от горячего тела к холодному. Теория теплообмена, наоборот, все внимание концентрирует на способах передачи теплоты. Раскрывая механизм и физическую сущность их различных видов, она дает оперативные зависимости для расчета параметров, как отдельных видов теплообмена, так и их совокупности, называемой сложным обменом.

Уясните и запомните такие понятия, как температурное поле, градиент температуры, передаваемая теплота, тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока.

Рассмотрение отдельных видов теплообмена, таких, как теплопроводность, конвекция и излучение, является методологическим приемом, вызванным сложностью реального теплообмена, в котором, как правило, одновременно участвуют все перечисленные виды распространения теплоты.

Литература: [1], с. 306—309.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое температурное поле? Каковы виды температурного поля?
2. Что такое передаваемая теплота, тепловой поток и поверхностная плотность теплового потока? В каких единицах они выражаются?
3. Что такое температурный градиент, каково его направление и в каких единицах он выражается?
4. На каком законе термодинамики базируется теория теплообмена?
5. Какая разница между поверхностной плотностью теплового потока и линейной плотностью теплового потока?
6. Что такое теплопроводность, конвекция и излучение? Каков механизм каждого из этих видов теплообмена?

Тема 2. Теплопроводность

Основной закон теплопроводности (закон Фурье). Теплопроводность. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Теплопроводность различных стенок при стационарном режиме. Граничные условия I рода. Определение теплопередачи через стенки. Граничные условия III рода. Коэффициент теплопередачи. Пути интенсификации процесса теплопередачи. Правило выбора материала теплоизоляции. Основные сведения о нестационарной теплопроводности.

Методические указания

Нужно понять значение закона Фурье для решение задач стационарной теплопроводности. Усвойте, что физически теплопроводность представляет собой процесс распространения теплоты путем теплового движения микрочастиц вещества без визуально наблюдаемого перемещения самих частиц.

Теплопроводность наблюдается в твердых телах, неподвижных жидких и газообразных веществах. Если происходит движение жидкости или газа, то теплопроводность в чистом виде имеет место в весьма тонком неподвижном слое, прилегающем к поверхности твердого тела.

Уясните назначение и состав условий однозначности при решении задач теплообмена. Поймите влияние рода граничных условий на решение уравнения теплопроводности при стационарном режиме. Разберитесь, как, применяя граничное условие I рода, получают решение по распространению температуры внутри тела, а применяя граничное условие III рода, получают решение по передаче теплоты от горячего носителя к холодному через разделяющую их стенку (теплопередача).

Конечная цель решения задач стационарной теплопроводности — определение теплового потока, т. е. количества теплоты, передаваемой за l с. Уясните разницу между линейной и поверхностной плотностями теплового потока, а также между коэффициентом теплопередачи и линейным коэффициентом теплопередачи. Разберитесь в способах интенсификации теплопередачи, а также в том, как надо правильно подбирать материалы теплоизоляции цилиндрического теплопровода. Уясните, почему критерии Bi и Fo определяют нестационарную теплопроводность при нагревании и охлаждении тела.

Литература: [1], с. 309—322, 326—332, 339.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под явлением теплопроводности? 2. Напишите уравнение теплопроводности Фурье. Объясните физический смысл входящих в него величин. 3. Каковы границы изменения теплопроводности для металлов, изоляционных и строительных материалов, жидкостей и газов? 4. От чего зависит теплопроводность? 5. Чем отличаются условия однозначности для стационарного и нестационарного режимов теплопроводности? 6. В чем отличие граничных условий I и III рода и к чему приводит это отличие при решении уравнений теплопроводности? 7. Напишите выражение теплового потока для теплопроводности через плоскую одно- и многослойную стенки. 8. Напишите выражение теплового потока для теплопроводности через цилиндрическую одно- и многослойную стенки. 9. Почему необходимо отличать поверхностную плотность теплового потока от линейной при рассмотрении теплопроводности через стенки трубы? 10. Что такое теплопередача и чем она отличается от теплопроводности? 11. Что называют термическим сопротивлением теплопередачи? 12. Что может происходить при неправильном выборе материала теплоизоляции цилиндрического теплопровода? Какое существует правило выбора теплоизоляции для этого случая? 13. Для чего стремятся интенсифицировать теплопередачу и какие для этого существуют пути? 14. Как влияет материал плоской стенки на перепад температур наружной и внутренней поверхностей стенки при теплопередаче?

Тема 3. Конвективный теплообмен

Физическая сущность конвективного теплообмена. Формула Ньютона - Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Основы теории подобия. Гидродинамическое и тепловое подобие. Критерии подобия и принцип их получения. Критериальное уравнение конвективного теплообмена. Определяющие и определяемые критерии подобия. Определяющая температура и определяющий линейный размер. Теплообмен при вынужденном движении жидкости или газа в трубах и каналах. Теплообмен при вынужденном поперечном омывании труб. Теплообмен при свободном движении жидкости. Теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества.

Методические указания

При решении задачи стационарной теплопроводности при граничных условиях III рода в полученное решение для уравнения теплопередачи входят коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , характеризующие теплообмен между теплоносителями и твердой стенкой. В этой задаче численные значения α_1 и α_2 считаются заданными.

Основная задача теории конвективного теплообмена — разработка зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи α . Опыт преподавания показывает, что этот раздел теории тепло- и массообмена является наиболее трудным. Для того чтобы уяснить, как вычислить α , нужно внимательно изучить материал учебника, в котором разбирается физическая сущность конвективного теплообмена на основе теории Прандтля. Коэффициент теплоотдачи α учитывает тепловое взаимодействие жидкости (или газа) и твердого тела. Поэтому α зависит от большого числа факторов. Существенный момент независимо от режима течения теплоносителя — конечный акт передачи теплоты теплопроводностью в тонком неподвижном слое жидкости (или газа), прилегающем к стенке. В случае ламинарного движения теплота от ядра потока к стенке передается теплопроводностью. В случае турбулентного потока перенос теплоты в неподвижный подслой, прилегающий к стенке, осуществляется также турбулентно перемещающимися макрочастицами теплоносителя. Совместное действие конвекции и теплопроводности называют конвективным теплообменом. Нужно понять, что система четырех дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных, описывающих конвективный теплообмен, совместно с условиями однозначности в принципе позволяет в результате строгого решения получить коэффициент теплоотдачи α . Однако практически при решении этой системы уравнений встречаются математические трудности. С другой стороны, экспериментальное определение α на натуральном объекте экономически нецелесообразно, так как необходимо провести очень большое число опытов для определения влияния на α каждого из факторов. При этом полученный результат будет пригоден только для объекта, на котором проводится эксперимент.

Теория подобия допускает проведение опытов не на натуральном объекте, а на его модели, в результате опыта позволяет распространять не все

подобные явления. Кроме того, базируясь на системе дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, теория подобия четко определяет условия подобия физических явлений и процессов. Теория подобия — теория эксперимента. Нужно хорошо разобраться в материале учебника, посвященном основам теории подобия, и принять суть трех теорем подобия. Усвойте принцип получения критериев подобия конвективного теплообмена из дифференциальных уравнений, описывающих этот процесс. Запомните, что определяющие критерии стационарного конвективного теплообмена (Re , Pr , Gr) составлены из параметров, входящих в условия однозначности, а определяемый критерий (Nu) наряду с параметрами, входящими в условия однозначности, включает в себя численное значение коэффициента теплоотдачи α .

Уясните значение второй теоремы подобия, позволяющей для подобных явлений записать общее решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена (не решая ее) в виде функции критериев подобия вида $(Nu, Re, Pr, Gr) = 0$. Уравнение получается строго теоретически на основании теории подобия. Для перехода к практике допускают, что полученное общее решение может быть записано в виде

$$Nu = A Re^n Pr^m Gr^v (Pr_{ж}/Pr_c)^{0.25}$$
, где A , n , m , v — коэффициенты, определяемые на основе экспериментальных данных.

Последнее выражение представляет собой критериальное уравнение (уравнение подобия) в самом общем виде. Это уравнение является полуэмпирическим, так как оно получено на основе общих теоретических соображений, а коэффициенты, входящие в него, находятся из опыта. Имея уравнение подобия, находят определяемый критерий Nu , а по нему искомое значение коэффициента теплоотдачи ($\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell}$).

После того как найден коэффициент теплоотдачи α , нетрудно рассчитать тепловой поток по формуле Ньютона - Рихмана.

Для условий теплообмена общее критериальное уравнение упрощается, например, при вынужденном движении жидкости по трубе $Gr \rightarrow l$ и $Nu = A Re^n Pr^m (Pr_{ж}/Pr_{cm})^{0.25}$, а при свободной конвекции $Re \rightarrow l$ и $Nu = A_1 Gr^n Pr^m (Pr_{ж}/Pr_{cm})^{0.25}$. Поймите необходимость введения в критериальное уравнение множителя $(Pr_{ж}/Pr_{cm})^{0.25}$, который учитывает влияние на критерий Nu , а следовательно, и на α направления теплового потока при теплоотдаче (нагревание или охлаждение жидкости). Уясните физический смысл основных критериев (Nu , Re , Pr , Gr) и при расчетах применяйте те критериальные зависимости, которые соответствуют конкретному виду задачи.

Литература: [1], с. 348—385, 388—391, 394—401.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое свободная и вынужденная конвекция? 2. Что такое динамический пограничный слой и тепловой пограничный слой? Какая между ними связь? 3. Что называется конвективным теплообменом? 4. Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией. 5. От каких факторов зависит

коэффициент теплоотдачи? В каких единицах его выражают? 6. В чем суть теории подобия? 7. В чем физический смысл критериев подобия? 8. Чем характеризуется критерий Nu ? 9. Что называется критериальным уравнением (уравнением подобия)? 10. Что обозначают индексы у критериев, входящих в уравнение подобия? 11. Как отличить определяющие критерии от определяемых? 12. Какие основные формулы применяют для различных случаев конвективного теплообмена? 13. Что такое «кризис кипения»? 14. Какие факторы отрицательно влияют на теплообмен при конденсации водяного пара?

Тема 4. Теплообмен излучением

Основные понятия и определения. Основные законы теплового излучения. Теплообмен излучением между твердыми телами. Защита от теплового излучения. Тепловое излучение газов.

Методические указания

Прежде всего уясните принципиальную разницу между теплообменом излучением и двумя уже известными видами теплообмена - теплопроводностью и конвекцией.

В процессе теплообмена излучением происходит двойное превращение энергии — внутренняя энергия превращается в энергию электромагнитных волн, которые, попадая на другое тело, вновь превращаются во внутреннюю энергию этого тела. Разберитесь в количественном соотношении между поглощенной, отраженной и пропущенной сквозь тело энергией электромагнитного излучения. Поняв это, можно будет управлять тепловым излучением в нужном для практики направлении. Так, например, при защите объектов от лучистой энергии на пути ее распространения ставят экраны, максимально отражающие лучистую энергию. Если максимальный нагрев необходим за счет лучистой энергии, объекту необходимо придать такие свойства, при которых осуществляется максимум поглощения лучистой энергии (покрытие краской, шероховатость и др.). Для получения максимальной пропускающей способности лучистой энергии (например, света) необходимо выбрать стенку с соответствующими свойствами. Основные законы излучения и экспериментальные данные по свойствам отдельных тел дают возможность решать конкретные задачи, связанные с лучистым теплообменом. Поэтому необходимо усвоить законы Планка, Вина, Кирхгофа, Стефана — Больцмана, методику и границы их применения. Практически в теплообмене участвуют одновременно все три его вида, поэтому при решении конкретных задач нужно различать «весомость» того или иного вида теплообмена, с тем чтобы уметь сознательно упрощать решение задач с допускаемой погрешностью.

Литература: [I], с. 402—420.

Вопросы для самопроверки

1. Какие длины волн характерны для тепловых лучей? 2. Что такое абсолютно черное, абсолютно белое и диатермичное тело? 3. Что такое лучистый поток, излучательность, спектральная излучательность? В каких единицах их выражают? 4. Сформулируйте законы теплового излучения. 5. Что такое

«эффективное излучение»? Чем оно отличается от собственного излучения? 6. Как определяют лучистый поток между параллельными плоскими стенками? Чему равен приведенный коэффициент излучения для этого случая? 7. Как определяют лучистый поток при расположении одного тела внутри другого? Чему равен приведенный коэффициент излучения для этого случая? 8. Для чего нужны экраны и какими свойствами они должны обладать? 9. Что такое сплошной и селективный спектры излучения? 10. Каковы особенности излучения газов по сравнению с твердыми телами? 11. Какие газы излучают и поглощают энергию излучения? 12. Как определяют коэффициент черноты газовой среды?

Тема 5. Сложный теплообмен. Теплообменные аппараты

Сложный теплообмен. Суммарный коэффициент теплоотдачи. Типы теплообменных аппаратов. Уравнение теплового баланса и теплопередачи. Основные схемы движения теплоносителей. Среднеарифметический и среднелогарифмический напоры. Основы теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов. Методы интенсификации теплообмена в рекуперативных теплообменниках.

Методические указания

Обычно передача теплоты от теплоносителя с высокой температурой к теплоносителю с низкой температурой происходит через разделительную стенку. В этом процессе, как правило, участвуют все виды теплообмена — теплопроводность, конвекция и излучение, которые были изучены в предыдущих темах. Теплообмен, учитывающий все виды теплообмена, называется сложным. Практически сложность теплообмена выражается в суммарном коэффициенте теплоотдачи α_{Σ} , который в силу независимости по своей природе излучения и конвективного теплообмена представляет собой сумму обоих видов теплового воздействия, а именно: $\alpha_{\Sigma} = \alpha_k + \alpha_u$

Нужно уметь оценить, какой из видов теплообмена является преобладающим. Для этого уже известными методами определяют α_k а коэффициент теплоотдачи за счет излучения может быть оценен по формуле:

$$\alpha_u = 0,23 \cdot \varepsilon \left(\frac{T_g + T_{cm}}{2} \right)^3, \text{ где } \varepsilon \text{ — приведенный коэффициент черноты системы;}$$

T_g и T_{cm} — температура газа и стенки соответственно.

Теплообменными аппаратами называют всякое устройство, в котором осуществляется процесс передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. Уясните классификацию аппаратов по принципу действия, обратив внимание на рекуперативные теплообменники как наиболее распространенные. Научитесь изображать схематично для рекуперативного теплообменника характер изменения температур рабочих жидкостей в функции поверхности нагрева для случаев прямотока и противотока в зависимости от соотношения между водяными эквивалентами.

Запомните, в каких случаях необходимо применение среднелогарифмического температурного напора, а в каких случаях можно ограничиться среднеарифметическим температурным напором.

Поймите основной принцип расчета теплообменного аппарата, связанный с уравнением теплоотдачи и уравнением теплового баланса. Особое внимание обратите на особенности теплообменников, в которых происходит изменение агрегатного состояния одного из теплоносителей (испарение или конденсация), уяснив, почему в этих случаях направление тока не влияет на эффективность работы теплообменника. Нужно понять, почему для вычисления среднелогарифмического напора независимо от схемы включения (прямоток или

противоток) справедлива формула:
$$\Delta t_{cp.l} = \frac{\Delta t_{\theta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\theta}}{\Delta t_m}},$$

где Δt_{θ} и Δt_m — наибольший и наименьший температурный напор соответственно.

Разберитесь в методах интенсификации теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах и для чего нужна интенсификация.

Литература: [I], с. 421—422, 424—429.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют сложным теплообменом? 2. Почему возможно суммировать коэффициент теплоотдачи, определяемый конвективным теплообменом, и коэффициент теплоотдачи, определяемый излучением? 3. Что называют теплообменным аппаратом и какие существуют типы аппаратов? 4. Как составляют тепловой баланс и уравнение теплопередачи для рекуперативного теплообменника? 5. Почему рекуперативный теплообменник с противоточной схемой при одинаковой начальной температуре холодной жидкости всегда компактнее, чем теплообменник с прямоточной схемой включения? 6. В каких случаях необходимо вычислять среднелогарифмический температурный напор? Когда можно применять среднеарифметический температурный напор? 7. Как проводится усреднение коэффициента теплопередачи? 8. Что является целью конструктивного теплового расчета рекуперативного теплообменника, а что является целью проверочного расчета? 9. Для чего нужно стремиться к интенсификации теплопередачи в теплообменниках и каковы методы интенсификации? 10. В чем особенность рекуперативных теплообменников, в которых один из носителей изменяет свое агрегатное состояние? 11. Какая формула применяется для определения среднелогарифмического температурного напора независимо от схемы «прямоток» или «противоток»? 12. Почему, несмотря на габаритные преимущества схемы «противоток», на практике находит применение схема «прямоток»?

Практические задания

Задание № 1. Теплопроводность в многослойной плоской стенке

Теплота газообразных продуктов горения топлива передается через стенку котла кипящей воде. На поверхности стенки заданы граничные условия третьего рода.

Температура газов $t_{f1} = \dots [^\circ\text{C}]$ (графа 1); температура воды $t_{f2} = \dots [^\circ\text{C}]$ (графа 2); коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1 = \dots [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ (графа 3); коэффициент теплоотдачи от стенки к воде $\alpha_2 = \dots [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ (графа 4).

Требуется определить термические сопротивления $R = \frac{1}{\alpha} = \dots [(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}]$, коэффициенты теплопередачи h , $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ и количество теплоты q , $[\text{Дж}]$, передаваемое от газов к воде через 1 м^2 поверхности стенки в секунду для следующих случаев:

а) стенка стальная, совершенно чистая, толщина $\delta_2 = \dots [\text{мм}]$ (графа 6); $\lambda_2 = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

б) стенка стальная, со стороны воды покрыта слоем накипи толщиной $\delta_3 = \dots [\text{мм}]$ (графа 7); $\lambda_3 = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

в) случай (б), дополнительное условие: на поверхности накипи имеется слой масла толщиной $\delta_4 = \dots [\text{мм}]$ (графа 8); $\lambda_4 = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

г) случай (в), дополнительное условие: со стороны газов стенка покрыта слоем сажи толщиной $\delta_1 = \dots [\text{мм}]$ (графа 5); $\lambda_1 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Приняв количество теплоты для случая а) за 100%, определить в процентах количество теплоты для всех остальных слоев.

Определить температуру $t_w = \dots [^\circ\text{C}]$, всех слоев стенки для случая г).

Условия задачи приведены в таблице 1.

Варианты заданий № 1

Таблица. 1

№ задачи	1	2	3	4	5	6	7	8
	$t_{f1},$ [°C]	$t_{f2},$ [°C]	$\alpha_1,$ [Вт/(м ² ·К)]	$\alpha_2,$ [Вт/(м ² ·К)]	$\delta_1,$ мм	$\delta_2,$ мм	$\delta_3,$ мм	$\delta_4,$ мм
1	1200	220	160	3500	1	16	10	1
2	1100	200	150	3000	2	14	5	0.5
3	1000	180	140	2500	1	12	4	1
4	900	160	130	2000	2	10	3	0.5
5	800	140	120	1500	1	8	2	1
6	850	150	60	1000	2	12	10	0.5
7	950	160	70	2000	1	14	9	1
8	1050	170	80	3000	2	16	8	0.5
9	1150	180	90	4000	1	18	7	1
10	1250	190	100	5000	2	20	6	0.5
11	900	225	50	1000	1	14	7	1
12	800	200	40	980	2	13	6	0.5
13	700	175	30	960	1	12	5	1
14	600	150	20	940	2	11	4	0.5
15	500	125	10	920	1	10	3	1
16	575	110	55	2200	2	22	8	0.5
17	675	120	50	2100	1	24	7	1
18	775	130	45	2000	2	26	6	1
19	875	140	40	1900	1	23	5	0.5
20	975	150	35	1800	2	30	4	1
21	1000	100	40	3000	1	10	2	0.5
22	900	125	50	4000	2	12	3	1
23	1050	135	60	3500	1	14	5	0.5
24	950	150	45	4500	2	16	6	1
25	800	200	55	2000	0,5	18	7	0.5
26	850	210	65	2100	1	20	5	1
27	975	175	42	3100	2	22	8	0,5
28	400	100	15	1000	0,5	10	5	1
29	500	120	20	1250	1	12	8	0,5
30	600	140	25	1500	1,5	15	4	1

Пример решения задания № 1

В качестве исходных данных выберем из таблицы 1 исходные значения параметров к задаче №1.

Температура газов $t_{f1}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Температура воды $t_{f2}=220\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1=160\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде $\alpha_2=3500\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

а) $\delta_2=16\text{ мм}$, $\lambda_2=50\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

б) $\delta_3=10\text{ мм}$, $\lambda_3=2,0\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

в) $\delta_4=1\text{ мм}$, $\lambda_4=0,1\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

г) $\delta_1=1\text{ мм}$, $\lambda_1=0,2\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Решение

Термические сопротивления, R , $[(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}]$:

от газов к стенке: $R_1=1/\alpha_1=1/160=0,00625$;

от стенки к кипящей воде: $R_2=1/\alpha_2=1/3500=0,000285$;

стальной стенки котла: $R_3=\delta_2/\lambda_2=0,016/50=0,00032$;

слоя накипи: $R_4=\delta_3/\lambda_3=0,01/2=0,005$;

слоя масла: $R_5=\delta_4/\lambda_4=0,001/0,1=0,01$;

слоя сажи: $R_6=\delta_1/\lambda_1=0,001/0,2=0,005$;

Коэффициент теплопередачи h , $[\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})]$:

а) чистой стальной стенки:

$$h = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{0,00625 + 0,000285 + 0,00032} = 146 ;$$

б) при наличии слоя накипи:

$$h = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{1}{0,00625 + 0,000285 + 0,00032 + 0,005} = 84,3 ;$$

в) при наличии слоя масла:

$$h = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{1}{0,00625 + 0,000285 + 0,00032 + 0,005 + 0,01} = 45,8$$

з) при наличии слоя сажи:

$$h = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} = \frac{1}{0,00625 + 0,000285 + 0,00032 + 0,005 + 0,01 + 0,005} = 37,2.$$

Количество теплоты q , [Дж], передаваемое от газов к воде через 1 м^2 поверхности стенки в секунду для следующих случаев:

а) чистой стальной стенки:

$$q = h(t_{f1} - t_{f2}) = 146(1200 - 220) = 143080; \quad 100\%$$

б) при наличии слоя накипи:

$$q = h(t_{f1} - t_{f2}) = 84,3(1200 - 220) = 82614; \quad 57,7\%$$

в) при наличии слоя масла:

$$q = h(t_{f1} - t_{f2}) = 45,8(1200 - 220) = 44884; \quad 31,4\%$$

з) при наличии слоя сажи:

$$q = h(t_{f1} - t_{f2}) = 37,2(1200 - 220) = 36456. \quad 25,4\%$$

Температуры всех слоев стенки для случая з), t_w , [°C]:

$$t_{w1} = t_{f1} - qR_1 = 1200 - 36456 \cdot 0,00625 = 972,2;$$

$$t_{w2} = t_{f1} - q(R_1 + R_6) = 1200 - 36456(0,00625 + 0,005) = 789,9;$$

$$t_{w3} = t_{f1} - q(R_1 + R_6 + R_3) = 1200 - 36456(0,00625 + 0,005 + 0,00032) = 778,2;$$

$$t_{w4} = t_{f1} - q(R_1 + R_6 + R_3 + R_4) =$$

$$1200 - 36456(0,00625 + 0,005 + 0,00032 + 0,005) = 595,9;$$

$$t_{w5} = t_{f1} - q(R_1 + R_6 + R_3 + R_4 + R_5) =$$

$$1200 - 36456(0,00625 + 0,005 + 0,00032 + 0,005 + 0,01) = 231,4.$$

Задание № 2. Конвективный теплообмен

В теплообменнике типа «труба в трубе» (см. рис. 1) необходимо нагреть воздух с массовым расходом $m_2 = \dots [кг/с]$ от температуры $t'_2 = \dots [°C]$ до температуры $t''_2 = \dots [°C]$. Теплота передается от дымовых газов с начальной температурой $t'_1 = \dots [°C]$ и конечной $t''_1 = \dots [°C]$. Дымовые газы движутся по внутренней стальной трубе диаметром $d_2/d_1 = 304/300$ мм. Воздух движется по кольцевому зазору противотоком к дымовым газам. Внутренний диаметр внешней трубы $d_3 = 504$ мм.

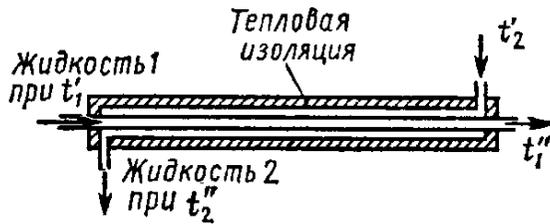


Рис. 1. Схема теплообменника «труба в трубе»

Определить площадь теплообмена A , длину теплообменной поверхности l и суммарную мощность N , необходимую на преодоление гидравлического сопротивления при движении теплоносителей по каналам теплообменника.

Условия задачи приведены в таблице 2.

Варианты заданий № 2

Таблица. 2

<i>№ задачи</i>	$t'_1, [^{\circ}\text{C}]$	$t''_1, [^{\circ}\text{C}]$	$t'_2, [^{\circ}\text{C}]$	$t''_2, [^{\circ}\text{C}]$	$m_2, [\text{кг/с}]$
1	600	400	30	250	0,95
2	550	300	20	120	0,9
3	650	350	25	200	1,2
4	1000	550	35	180	0,75
5	1200	600	32	150	0,8
6	950	250	23	130	0,92
7	650	450	31	200	1,5
8	550	350	28	160	1,4
9	850	150	25	140	1,0
10	1200	200	30	100	1,3
11	1100	300	22	60	0,75
12	900	300	18	80	0,85
13	750	250	24	90	0,7
14	850	450	25	50	1,25
15	1200	600	35	70	1,5
16	950	250	32	85	1,2
17	650	450	23	200	0,75
18	550	350	31	180	0,8
19	850	150	28	170	0,92
20	1200	200	25	150	1,5
21	1100	300	30	140	1,4
22	900	300	31	150	1,0
23	750	250	28	130	1,3
24	850	450	25	200	0,75
25	1200	600	30	160	0,75
26	950	250	22	140	0,85
27	650	450	18	100	0,7
28	550	350	24	60	1,25
29	600	250	25	80	1,5
30	700	350	23	90	1,2

Пример решения задания № 2

В качестве исходных данных выберем из таблицы 2 исходные значения параметров к задаче №1.

Массовый расход воздуха $m_2=0,95$ кг/с;

Начальная температура $t'_2=30$ °С;

Конечная температура $t''_2=250$ °С;

Начальная температура дымовых газов $t'_1=600$ °С;

Конечная температура дымовых газов $t''_1=400$ °С;

Внутренний диаметр внутренней стальной трубы $d_1 = 0,300$ м;

Наружный диаметр внутренней стальной трубы $d_2 = 0,304$ м;

Коэффициент теплопроводности материала трубы $\lambda_c = 46$ Вт/(м·К);

Воздух движется по кольцевому зазору противотоком к дымовым газам;

Внутренний диаметр внешней трубы $d_3 = 0,504$ м.

Решение

Находим среднеарифметическое значение температур \bar{t} теплоносителей и соответствующие значения физических свойств воздуха и дымовых газов при этих температурах:

Для воздуха $\bar{t}_2 = 0,5(t'_2 + t''_2) = 0,5(30 + 250) = 140$ °С.

Для дымовых газов $\bar{t}_1 = 0,5(t'_1 + t''_1) = 0,5(600 + 400) = 500$ °С.

Соответствующие значения физических свойств, при этих температурах для воздуха выбираем из таблицы 4, для дымовых газов из таблицы 5 приложения 1.

Для воздуха:

$\bar{t}_2, \text{°C}$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$c_{p2},$ Дж/(кг·К)	$\lambda_2,$ Вт/(м·К)	$\nu_2 \cdot 10^{-6},$ м ² /с	Pr_2
140	0,854	1013	0,0350	27,80	0,684

Для дымовых газов:

$\bar{t}_1, \text{°C}$	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$c_{p1},$ Дж/(кг·К)	$\lambda_1,$ Вт/(м·К)	$\nu_1 \cdot 10^{-6},$ м ² /с	Pr_1
500	0,457	1185	0,0656	76,30	0,630

Передаваемый тепловой поток от дымовых газов к воздуху:

$$Q = m_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2) = 0,95 \cdot 1013 (250 - 30) = 211000 \text{ Вт.}$$

Необходимый массовый расход дымовых газов:

$$m_1 = \frac{Q}{c_{p2} (t'_1 - t''_1)} = \frac{211000}{1185(600 - 400)} = 0,89 \text{ кг/с.}$$

Скорость движения теплоносителей:

воздуха в кольцевом канале:

$$w_2 = \frac{4m_2}{\pi(d_3^2 - d_2^2)\rho_2} = \frac{4 \cdot 0,95}{3,14(0,504^2 - 0,304^2)0,854} = 8,74 \text{ м/с};$$

дымовых газов в трубе:

$$w_1 = \frac{4m_1}{\pi d_1^2 \rho_1} = \frac{4 \cdot 0,89}{3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 0,457} = 27,6 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса для потоков теплоносителей:

воздуха в кольцевом канале:

$$\text{Re}_{f2} = \frac{w_2 d_3}{\nu_2} = \frac{8,74 \cdot 0,2}{27,8 \cdot 10^{-6}} = 62850,$$

здесь $d_3 = (d_3 - d_2) = 0,504 - 0,304 = 0,2 \text{ м};$

дымовых газов в трубе:

$$\text{Re}_{f1} = \frac{w_1 d_1}{\nu_1} = \frac{27,6 \cdot 0,3}{7,63 \cdot 10^{-6}} = 108500.$$

Так как значения числа $\text{Re} > 10^4$ - режим течения турбулентный.

При данном режиме критериальное уравнение, отражающее связь числа

Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля имеет вид: $Nu = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}$.

Число Нуссельта для воздуха в кольцевом канале:

$$Nu_{f2} = 0,021 \text{Re}_{f2}^{0,8} \text{Pr}_{f2}^{0,43} = 0,021 \cdot 62850^{0,8} \cdot 0,684^{0,43} = 123.$$

Число Нуссельта для дымовых газов в трубе:

$$Nu_{f1} = 0,021 \text{Re}_{f1}^{0,8} \text{Pr}_{f1}^{0,43} = 0,021 \cdot 108500^{0,8} \cdot 0,63^{0,43} = 184.$$

Коэффициенты теплоотдачи:

от наружной поверхности внутренней трубы к воздуху:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{f2} \lambda_2}{d_3} = \frac{123 \cdot 0,035}{0,2} = 21,5 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)};$$

от дымовых газов к внутренней поверхности внутренней трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{f1} \lambda_1}{d_1} = \frac{184 \cdot 0,0656}{0,3} = 40,5 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}.$$

Коэффициент теплопередачи:

$$h = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = 1 / \left(\frac{1}{40,5} + \frac{0,002}{46} + \frac{1}{21,5} \right) = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}).$$

Здесь $\delta = (d_2 - d_1)/2 = (0,304 - 0,300)/2 = 0,002 \text{ м}$.

Площадь поверхности нагрева:

$$A = Q / (h \cdot \Delta t_{cp}) = 211000 / (14 \cdot 360) = 42 \text{ м}^2.$$

Здесь $\Delta t_{cp} = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln[(t'_1 - t''_2)/(t''_1 - t'_2)]} = \frac{(600 - 250) - (400 - 30)}{\ln[(600 - 250)/(400 - 30)]} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$.

Длина теплообменной поверхности:

$$l = A / (\pi d) = 42 / (3,14 \cdot 0,304) = 44 \text{ м}.$$

Здесь $d = d_2$ - диаметр со стороны меньшего α ($\alpha_2 < \alpha_1$).

Коэффициенты трения для теплоносителей:

при движении воздуха в кольцевом канале:

$$\xi_2 = 0,316 / \text{Re}_{f_2}^{0,25} = 0,316 / 62850^{0,25} = 0,02 ;$$

при движении дымовых газов в трубе:

$$\xi_1 = 0,316 / \text{Re}_{f_1}^{0,25} = 0,316 / 108500^{0,25} = 0,00174 .$$

Мощность на прокачку теплоносителей:

на прокачку воздуха:

$$N_2 = 0,5 m_2 \xi_2 \frac{l}{d_3} w_2^2 = 0,5 \cdot 0,95 \cdot 0,02 \cdot \frac{44}{0,2} \cdot 8,74^2 = 160 \text{ Вт};$$

на прокачку дымовых газов:

$$N_1 = 0,5 m_1 \xi_1 \frac{l}{d_1} w_1^2 = 0,5 \cdot 0,89 \cdot 0,0174 \cdot \frac{44}{0,3} \cdot 27,6^2 = 865 \text{ Вт}.$$

Суммарная мощность, необходимая на преодоление гидравлического сопротивления при движении теплоносителей по каналам теплообменника определится как: $N = N_1 + N_2 = 865 + 160 = 1025 \text{ Вт}$.

Задание № 3. Теплообмен излучением

Стенка трубопровода диаметром $d = \dots [мм]$ нагрета до температуры $t_1 = \dots [°C]$ и имеет коэффициент теплового излучения ε_1 . Трубопровод помещен в канал сечением $b \times h [мм]$, поверхность которого имеет температуру $t_2 = \dots [°C]$ и коэффициент лучеиспускания $c_2 = \dots [Вт/(м^2 \cdot K^4)]$. Рассчитать приведенный коэффициент лучеиспускания $c_{пр}$ и потери теплоты Q трубопроводом за счет лучистого теплообмена.

Условия задачи приведены в таблице 3.

Значения коэффициента теплового излучения материалов ε_1 приведены в таблице 6 приложения 2.

Варианты заданий № 3

Таблица. 3

№ задачи	$d, [мм]$	$t_1, [°C]$	$t_2, [°C]$	$c_2, [Вт/(м^2 \cdot K^4)]$	$b \times h, [мм]$	Материал трубы
1	400	527	127	5,22	600x800	сталь окисленная
2	350	560	120	4,75	480x580	алюминий шероховатый
3	300	520	150	3,75	360x500	бетон
4	420	423	130	5,25	400x600	железо литое
5	380	637	200	3,65	550x500	латунь окисленная
6	360	325	125	4,50	500x700	медь окисленная
7	410	420	120	5,35	650x850	сталь полированная
8	400	350	150	5,00	450x650	алюминий окисленный
9	450	587	110	5,30	680x580	латунь полированная
10	460	547	105	5,35	480x600	медь полированная
11	350	523	103	5,20	620x820	сталь шероховатая
12	370	557	125	5,10	650x850	чугун обточенный
13	360	560	130	4,95	630x830	алюминий полированный

Продолжение таблицы. 3

14	250	520	120	4,80	450x550	<i>латунь прокатная</i>
15	200	530	130	4,90	460x470	<i>сталь полированная</i>
16	280	540	140	5,00	480x500	<i>чугун шероховатый</i>
17	320	550	150	5,10	500x500	<i>алюминий окисленный</i>
18	380	637	200	3,65	550x500	<i>латунь полированная</i>
19	360	325	125	4,50	500x700	<i>медь полированная</i>
20	410	420	120	5,35	650x850	<i>сталь шероховатая</i>
21	400	350	150	5,00	450x650	<i>чугун обточенный</i>
22	450	587	110	5,30	680x580	<i>алюминий полированный</i>
23	460	547	105	5,35	480x600	<i>латунь прокатная</i>
24	350	523	103	5,20	620x820	<i>сталь окисленная</i>
25	370	557	125	5,10	650x850	<i>алюминий шероховатый</i>
26	450	587	110	5,30	450x650	<i>бетон</i>
27	460	547	105	5,35	680x580	<i>железо литое</i>
28	350	523	103	5,20	480x600	<i>латунь окисленная</i>
29	370	557	125	5,10	620x820	<i>медь окисленная</i>
30	280	540	140	5,00	480x500	<i>сталь полированная</i>

Пример решения задания № 3

В качестве исходных данных выберем из таблицы 3 исходные значения параметров к задаче №1.

Диаметр трубопровода $d = 400$ мм;

Температура стенки трубы $t_1 = 527$ °C ($T_1 = 800$ K);

Коэффициент теплового излучения $\varepsilon_1 = 0,8$ (сталь окисленная)

Температура канала $t_2 = 127$ °C ($T_2 = 400$ K);

Коэффициент лучеиспускания канала $c_2 = 5,22$ Вт/(м²·К⁴);

Сечение канала $b \times h = 600 \times 800$ мм.

Решение

Площадь поверхности трубы на единицу длины 1 м:

$$F_1 = \pi d \cdot 1 = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 1 = 1,256 \text{ м}^2;$$

Площадь поверхности канала на единицу длины 1 м:

$$F_2 = (2b + 2h) \times 1 = (2 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,8) \cdot 1 = 2,8 \text{ м}^2;$$

Коэффициент теплового излучения канала:

$$\varepsilon_2 = c_2 / c_0 = 5,22 / 5,67 = 0,921,$$

здесь $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

Для случая, когда тело с площадью F_1 , находится внутри другого тела с площадью F_2 , приведенный коэффициент теплового излучения системы двух тел

определяется: $\varepsilon_{np} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}$, подставляя исходные значения получим:

$$\varepsilon_{np} = \left[\frac{1}{0,8} + \frac{1,256}{2,8} \left(\frac{1}{0,921} - 1 \right) \right]^{-1} = 0,776.$$

Приведенный коэффициент лучеиспускания системы двух тел определяется: $c_{np} = \varepsilon_{np} c_0 = 0,776 \cdot 5,67 = 4,4$ Вт/(м²·К⁴).

Потери теплоты Q трубопроводом за счет лучистого теплообмена:

$$Q = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 = 0,776 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{800}{100} \right)^4 - \left(\frac{400}{100} \right)^4 \right] \cdot 1,256 = 21,22 \text{ ,кВт}.$$

Приложение 1

Физические свойства воздуха [5]

Таблица. 4

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, [\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}]$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
20	1,205	1009	0,0259	15,06	0,703
30	1,165	1009	0,0267	16,00	0,701
40	1,128	1005	0,0276	16,96	0,699
50	1,093	1005	0,0283	17,95	0,698
60	1,060	1005	0,0290	18,97	0,696
70	1,029	1009	0,0296	20,02	0,694
80	1,000	1009	0,0305	21,09	0,692
90	0,972	1009	0,0313	22,10	0,690
100	0,946	1009	0,0321	23,13	0,688
120	0,898	1009	0,0334	25,45	0,686
140	0,854	1013	0,0350	27,80	0,684
160	0,815	1017	0,0364	30,09	0,682
180	0,779	1022	0,0378	32,49	0,681
200	0,746	1026	0,0393	34,85	0,680

Физические свойства дымовых газов [6]

Таблица. 5

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, [\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}]$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
100	0,950	1068	0,0313	21,54	0,690
200	0,748	1097	0,0401	32,80	0,670
300	0,617	1122	0,0484	45,81	0,650
400	0,525	1151	0,0570	60,38	0,640
500	0,457	1185	0,0656	76,30	0,630
600	0,505	1214	0,0742	93,61	0,620
700	0,363	1239	0,0827	112,1	0,610
800	0,330	1264	0,0915	131,8	0,600
900	0,301	1290	0,0100	152,5	0,590
1000	0,275	1306	0,0109	174,3	0,580
1100	0,257	1323	0,01175	197,1	0,570
1200	0,240	1340	0,01262	221,0	0,560

Интегральный коэффициент теплового излучения материалов [6]

Таблица. 6

<i>Материал</i>	ε
Алюминий	
шероховатый	0,055
окисленный	0,15
полированный	0,048
Бетон	0,80
Железо литое необработанное	0,91
Латунь	
окисленная	0,60
полированная	0,03
прокатанная	0,20
Медь	
окисленная	0,62
полированная	0,02
Сталь	
окисленная	0,80
шероховатая	0,95
полированная	0,54
Чугун	
обточенный	0,65
окисленный, шероховатый	0,96

Литература

1. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.: ВШ. – 1980. – 469 с.
2. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. - М.: ВШ. – 1988. – 479 с.
3. Андрианова Т. Н., Дзампов Б. В. и др. Сборник задач по технической термодинамике. -М.: Издательство МЭИ, 2000. – 356 с.
4. Теплотехнический справочник /Под ред. В.Н. Юрнева и П.Б. Лебедева. – Т.1 – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
5. Теплотехника: Учебник для вузов. /В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер, и др. /Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1999. – 671 с.
6. Авчухов В. В., Паюсте Б. Я. Задачник по процессам теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.