

МЧС РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ



М.Н.Акимов, А.А.Кузьмин, Н.Н.Романов

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания по самостоятельному изучению
дисциплины и выполнению контрольных работ
для заочной формы обучения
по специальности 280104.65 – «Пожарная безопасность»

Санкт-Петербург, 2011

М.Н. Акимов, А.А. Кузьмин, Н.Н. Романов. ТЕПЛОТЕХНИКА. Методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольных работ для заочной формы обучения по специальности 280104.65 – «Пожарная безопасность» / Под ред. В.С. Артамонова. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2011. – 96 с.

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой и содержит необходимые методические рекомендации по изучению курса «Теплотехника». Приведены необходимые теоретические сведения по тематике выполняемых контрольных заданий, предлагаются варианты контрольных заданий, задачи для самостоятельного решения, рекомендации по использованию Mathcad и Excel при выполнении контрольных заданий, таблицы теплофизических параметров и перечень рекомендованной учебной литературы. Методические указания предназначены для слушателей Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России заочной и дистанционной форм обучения.

Рецензенты: **А.В. Шарков**, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики);
Д.П. Волков, кандидат технических наук, доцент (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики);
Ю.Г. Баскин, доктор педагогических наук, профессор (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России)

ВВЕДЕНИЕ

В курсе «Теплотехника» изучаются общие законы технической термодинамики и теплопередачи, а также термодинамические процессы и законы теплообмена при пожаре с целью прогнозирования оперативной обстановки на пожаре, ограничения развития пожара и разработки мер по его предупреждению.

Курс «Теплотехника» состоит из двух разделов: «Термодинамика» и «Теория тепломассообмена и промышленная теплотехника». При изучении тем каждого из разделов необходимо уяснить существо разбираемого вопроса и хорошо представлять его главное содержание: математическое описание явлений должно способствовать пониманию их физической сущности. Если при изучении курса у слушателей возникают вопросы, они могут получить консультацию в письменной и устной форме.

Требования к оформлению контрольной работы следующие.

1. Контрольная работа выполняется в отдельной ученической тетради четким разборчивым почерком, при этом в тетради должны быть поля, а страницы пронумерованы.

2. Графики выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в тетрадь в соответствии с выполняемым заданием.

3. При использовании уравнений, табличных значений и других справочных данных должны наличествовать ссылки на источник (название источника и автор, страница, номер уравнения, номер таблицы и др.).

4. При выполнении расчетных операций в обязательном порядке должен присутствовать комментарий, разъясняющий суть выполняемой операции, должно быть исходное уравнение, необходимые алгебраические преобразования, подстановка расчетных значений вместе с единицами измерения, математические операции, **в том числе и над единицами измерения**, ответ в виде числа и единицы измерения.

5. В конце контрольной работы приводится перечень используемой литературы, контрольная работа подписывается слушателем, проставляется дата выполнения работы.

6. В конце тетради, в которой выполняется контрольная работа, должно оставаться не менее одного чистого листа для рецензии преподавателя.

Численные значения, необходимые для выполнения индивидуального задания, зависят от номера зачетной книжки слушателя. Если номер зачетной книжки имеет один знак, например, № 1, то слева необходимо приписать 00, т. е. номер варианта 001. Если номер зачетной книжки имеет 2 знака, например, № 10, то слева необходимо приписать 0, т. е. номер варианта 010. Если номер зачетной книжки имеет 4 знака, например, № 1020, то необходимо использовать только 3 знака справа, т. е. номер варианта 020. Таким образом, любой одно- двух- и более значный номер зачетной

книжки приводится к трехзначному номеру варианта выполняемого задания. Например, в числе 012 первая цифра номера варианта 0, вторая 1, последняя 2 определяют численные значения исходных параметров задания.

При выполнении контрольной работы № 1 выполняются задание 1 и задание 2, при выполнении контрольной работы № 2 — задание и задание 4.

1. ТЕРМОДИНАМИКА

Предмет, задачи и содержание курса теплотехники. Значение теплотехнических знаний для сотрудников пожарной охраны. Место и роль курса в общей системе подготовки специалистов для органов и подразделений пожарной охраны. Структура и методика изучения курса.

Методические указания

Теплотехника — общетехническая дисциплина, которая изучает способы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепло- и парогенераторов, тепловых и холодильных машин, аппаратов и устройств. Теоретическими основами теплотехники являются техническая термодинамика и теория тепло- и массообмена.

Раздел 1. Термодинамика

ТЕМА 1. Основные понятия и определения термодинамики

Предмет термодинамики и ее методы. Термодинамическая система. Основные параметры состояния. Равновесное и неравновесное состояние. Уравнения состояния. Равновесные и неравновесные состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы. Обратимые и необратимые процессы

Методические указания

Техническая термодинамика — наука, изучающая взаимопревращения теплоты и работы и условия, при которых эти превращения совершаются наиболее эффективно. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми и механическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Теоретическим фундаментом, на котором базируются все выводы технической термодинамики, являются первый и второй законы термодинамики, представляющие собой обобщение опыта познания человеком природы. Основная особенность метода термодинамики — логически последовательное применение аналитических выражений первого и второго законов термодинамики совместно с уравнением состояния рабочего тела, без использования каких-либо гипотез о внутреннем его строении. Этот метод оказывается эффективным как при теоретических выводах формул, так и при анализе работы различных тепловых и холодильных машин и установок. При изучении темы студент должен внимательно разобрать такие понятия, как термодинамическая система, рабочее тело и внешняя сре-

да, равновесное и неравновесное состояния рабочего тела, термодинамический процесс.

Необходимо усвоить определения и физическую суть таких понятий, как равновесный и неравновесный, обратимый и необратимый термодинамические процессы. Понять, что равновесное состояние рабочего тела, также как равновесный и обратимый процессы, является научной абстракцией, как некоторые идеализированные модели реальных состояний и процессов. Реальные состояния и процессы приближаются к идеализированным при условии очень малых изменений параметров состояния и когда время между последовательными изменениями состояния достаточно велико. Однако именно введение этих идеализированных понятий позволило построить стройный математический аппарат термодинамики, позволяющий получать результаты, достаточно близкие к практике.

Для усвоения последующего материала необходимо уяснить, что теплота и работа представляют собой определенные формы передачи энергии — тепловую и механическую, причем работа может переходить в теплоту, а теплота в работу, т. е. они взаимопревращаемы (тема 2). Работа всегда полностью превращается в теплоту, в то время как переход теплоты в работу имеет определенные ограничения даже в идеальном процессе (тема 3). Взаимное превращение теплоты и работы в тепловой машине осуществляется с помощью рабочего тела, которое благодаря тепловому и механическому воздействию должно обладать способностью значительно изменять свой объем. Поэтому в качестве рабочего тела в тепловых машинах используется газ или пар. Физическое состояние рабочего тела в термодинамике определяется тремя параметрами: абсолютным давлением p , удельным объемом v и абсолютной температурой T . Эти три параметра называются основными и связаны между собой уравнением состояния $F(p, v, T) = 0$. Независимые, т. е. выбираемые произвольно, два любых параметра, а третий определяют из уравнения состояния. Например, если p и v независимые параметры, то $T = \varphi(p, v)$, где $\varphi(p, v)$ — функция, определяемая при решении уравнения состояния относительно зависимого параметра T .

Для понимания физической сути изучаемых закономерностей термодинамики и принципов работы различных теплотехнических устройств нужно овладеть принципом графического изображения любых процессов, включая круговые (циклы) в термодинамических диаграммах. Необходимо уяснить, что графически можно изобразить только равновесные обратимые процессы и циклы, которые совершаются рабочим телом.

Во всех теплотехнических установках, в которых в качестве рабочего тела используют газ, он считается идеальным, т. е. газом, состоящим из молекул — материальных точек, не имеющих размеров и между которыми отсутствуют силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), кроме

упругих соударений. Как известно из физики, такой газ подчиняется уравнению состояния Клапейрона, которое может быть записано для m кг газа ($pV = mRT$) и для 1 кг газа ($pv = RT$, где $v = V/m$ — удельный объем газа, $\text{м}^3/\text{кг}$).

Понятие идеального газа является научной абстракцией, моделью реального газа, дающей хорошую сходимость с практикой, когда состояние газа далеко от состояния сжижения. Применение этой модели позволяет построить достаточно простые аналитические зависимости термодинамики, применение которых к тепловым машинам дает, как правило, приемлемую сходимость с практикой.

Для насыщенного пара, т. е. для состояния, близкого к состоянию сжижения, модель идеального газа неприемлема. В этом случае приходится применять очень сложные модели и уравнения реальных газов, в которых учитывают собственные размеры молекул, а также силы взаимодействия между ними.

Уясните получение уравнения состояния Менделеева-Клапейрона для одного моля идеального газа. Важно понять различие между удельной газовой постоянной, принимающей определенное значение для каждого газа, и универсальной газовой постоянной, одинаковой для всех газов и равной $R_{\mu} = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Запомните связь между этими газовыми постоянными и уясните физический смысл каждой из них. В этой теме раскрывается необходимый комплекс определений и понятий, на основе которых строится все дальнейшее изложение технической термодинамики.

Задачи для самостоятельного решения

1.1. Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 100 бар при температуре 15 °С. После расходования части кислорода давление понизилось до 76 бар, а температура упала до 10 °С. Определить массу израсходованного кислорода.

Решение. Перед решением задачи осуществляется перевод данных в Международную систему единиц СИ: $V = 0,02 \text{ м}^3$; $T = 273 + 15 = 288 \text{ К}$; $T = 273 + 10 = 273 \text{ К}$; $P = 100 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P = 76 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

$$m = \frac{pV\mu}{RT}.$$

имеем

$$\text{Следовательно, до расходования } m_1 = \frac{10^7 \cdot 0,02 \cdot 32}{8314 \cdot 288} = 2,67 \text{ кг},$$

а после расходования $m_2 = \frac{76 \cdot 10^5 \cdot 0,02 \cdot 32}{8314 \cdot 273} = 2,07 \text{ кг}$,

Таким образом, $\Delta m = m_1 - m_2 = 2,67 - 2,07 = 0,6 \text{ кг}$.

Ответ: $\Delta m = 0,6 \text{ кг}$.

1.2. Газ при давлении $1,4 \text{ МПа}$ и температуре $55 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет объем 4 л . Чему равен объем этой массы газа при нормальных условиях?

Ответ: $V = 0,05 \text{ м}^3$.

1.3. В баллоне находится газ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз уменьшится давление газа, если 25% его выйдет из баллона, а температура при этом понизится на $10 \text{ }^\circ\text{C}$?

Ответ: В 1,38 раза.

1.4. При уменьшении объема газа в 5 раз давление увеличилось на 200 кПа , а абсолютная температура увеличилась на 10%. Каким было первоначальное давление?

Ответ: $P_1 = 45 \text{ кПа}$.

1.5. В баллоне емкостью $V = 6,2 \text{ л}$ находится азот при нормальных условиях (НУ). После того, как в баллон было дополнительно введено некоторое количество азота, давление в баллоне возросло до $P_2 = 1,8 \text{ атм}$, а температура не изменилась. Определить массу азота, введенного в баллон.

Ответ: $\Delta m = 0,006 \text{ кг}$.

1.6. В баллоне объемом 5 л находится азот под давлением $1,3 \text{ МПа}$ и при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$. После того как из баллона было взято 10 г азота, температура в баллоне понизилась до $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить новое значение давления в баллоне.

Ответ: $P = 1,06 \text{ МПа}$.

1.7. При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при нагревании его на 120 К давление возросло в 2,5 раза?

Ответ: $T = 80 \text{ К}$.

1.8. Какая масса воздуха m выйдет из комнаты объемом $V = 30 \text{ м}^3$ при повышении температуры от $T_1 = 290 \text{ К}$ до $T_2 = 320 \text{ К}$ при давлении равном 1 атм ?

Ответ: $\Delta m = 3,38 \text{ кг}$.

1.9. В баллоне емкостью 40 л находится кислород при давлении 112 ат по манометру; температура его $37 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферное давление равно 736 мм рт. ст. Определить массу кислорода?

Ответ: $m = 5,5 \text{ кг}$.

1.10. Масса пустого баллона для кислорода емкостью 50 л равна 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре 20 °С до давления 100 бар.

Ответ: $m = 86,57$ кг.

1.11. Определить плотность окиси углерода (СО) при $P = 1$ бар и температуре 15 °С.

Ответ: $\rho = 1,17$ кг/м³.

1.12. В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м³ воздуха при давлении 0,5 МПа. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 0,8 МПа температура воздуха не изменилась.

Ответ: $V_2 = 0,5$ м³.

1.13. Давление газа в баллоне при температуре 42 °С равно 6,1 МПа. Предельное давление, которое может выдержать баллон, составляет 40 МПа. При какой температуре возможен разрыв стенок баллона?

Ответ: $T = 2065$ К.

1.14. Во сколько раз объем определенной массы газа при –20 °С меньше, чем при 20 °С, если давление в обоих случаях одинаковое?

Ответ: в 1,16 раза.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие термодинамические параметры характеризуют состояние идеального газа?

2. Что такое абсолютная температура, ее единицы измерения?

3. Основные температурные шкалы, связь между ними.

4. Что такое абсолютное, атмосферное, избыточное, вакуумметрическое давления, связь между ними, единицы измерения, соотношения между основными единицами измерения: Паскаль, физическая атмосфера, техническая атмосфера, миллиметры ртутного столба, метры водяного столба?

5. Что такое удельный объем, единицы измерения удельного объема, связь между удельным объемом и плотностью?

ТЕМА 2. Смеси рабочих тел. Теплоемкость

Способы задания состава смеси, соотношения между массовыми и объемными долями. Вычисление параметров состояния смеси, определение кажущейся молекулярной массы и газовой постоянной смеси, определение парциальных давлений компонентов.

Массовая, объемная и молярная теплоемкости. Теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении. Зависимость теплоемкости от температуры и давления. Средняя и истинная теплоемкости. Форму-

лы и таблицы для определения теплоемкостей. Теплоемкость смеси рабочих тел.

Методические указания

При изучении газовой смеси необходимо понять, что основным здесь является умение определять газовую постоянную смеси газов, заданной массовым и объемным составом. Знание газовой постоянной смеси позволяет при исследовании термодинамических процессов пользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона так же, как и для отдельного газа.

Задачи для самостоятельного решения

2.1. В 1 м^3 сухого воздуха содержится примерно $0,21 \text{ м}^3$ кислорода и $0,79 \text{ м}^3$ азота. Определить массовый состав воздуха и его газовую постоянную.

Ответ: $g_{\text{O}_2} = 0,23$; $g_{\text{N}_2} = 0,77$; $R_{\text{см}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

2.2. Смесь газов состоит из водорода (H_2) и окиси углерода (CO). Массовая доля водорода равна $6,67\%$. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Ответ: $R_{\text{см}} = 552 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\nu = 1,5 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

2.3. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: $\text{CO}_2 = 12,3\%$; $\text{O}_2 = 7,2\%$; $\text{N}_2 = 80,5\%$. Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$ и $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\mu_{\text{см}} = 30,3 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$; $R_{\text{см}} = 274 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\nu = 2,94 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $\rho = 0,34 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

2.4. Массовый состав смеси следующий: $\text{CO}_2 = 18\%$; $\text{O}_2 = 12\%$ и $\text{N}_2 = 70\%$. До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при $t=180^\circ\text{C}$ 8 кг ее занимали объем, равный 4 м^3 .

Ответ: $P = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2.5. Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа (CO_2) равно $1,2 \text{ бар}$, давление смеси $P_{\text{см}} = 3 \text{ бар}$.

Ответ: $g_{\text{CO}_2} = 0,51$; $g_{\text{N}_2} = 0,49$.

2.6. Газовая смесь имеет следующий массовый состав: $\text{CO}_2 = 12\%$; $\text{O}_2 = 8\%$ и $\text{N}_2 = 80\%$. До какого давления нужно сжать эту смесь, чтобы плотность ее составляла $1,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$?

Ответ: $P = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2.7. Определить массовый и объемный составы смеси водорода с азотом, если газовая постоянная ее равна $R = 922 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$. Давление смеси равно 720 мм рт. ст.

Ответ: $g_{\text{N}_2} = 0,84$; $g_{\text{H}_2} = 0,16$; $r_{\text{N}_2} = 0,27$; $r_{\text{H}_2} = 0,73$.

2.8. Определить парциальные давления компонентов смеси водорода с азотом, если известно, что давление смеси равно $0,96 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а ее газовая постоянная равна $R = 922 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Ответ: $P_{\text{N}_2} = 0,26 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P_{\text{H}_2} = 0,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2.9. При давлении 820 мм рт. ст. и температуре 27°C плотность смеси кислорода O_2 и углекислого газа CO_2 равна $1,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Определить массовый и объемный составы смеси.

Ответ: $g_{\text{O}_2} = 0,33$; $g_{\text{CO}_2} = 0,67$; $r_{\text{O}_2} = 0,4$; $r_{\text{CO}_2} = 0,6$.

2.10. В смеси окиси углерода (CO) и углекислого газа (CO_2) находится 12 кг окиси углерода: молярная масса смеси равна $41 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. Определить массу смеси.

Ответ: $m = 93,8 \text{ кг}$.

2.11. Плотность смеси азота N_2 и углекислого газа CO_2 при давлении $1,4 \text{ бар}$ и температуре 45°C равна $2,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Определить массовый и объемный составы смеси.

Ответ: $g_{\text{CO}_2} = 0,81$; $g_{\text{N}_2} = 0,19$; $r_{\text{CO}_2} = 0,73$; $r_{\text{N}_2} = 0,27$.

2.12. В резервуаре емкостью 10 м^3 под давлением $1,6 \text{ бар}$ находится газовая смесь, состоящая из 8 кг азота N_2 , 6 кг кислорода O_2 и некоторого количества углекислого газа CO_2 . Температура смеси 27°C . Определить массу углекислого газа и парциальные давления компонентов.

Ответ: $P_{\text{N}_2} = 0,71 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P_{\text{O}_2} = 0,47 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P_{\text{CO}_2} = 0,42 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $m = 21,4 \text{ кг}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определение массовой доли (массовой концентрации), единицы ее измерения, возможные пределы вариации величины.
2. Определение объемной доли (объемной концентрации), единицы ее измерения, возможные пределы вариации величины, связь между массовой и объемной долями.
3. Определение молярной доли (молярной концентрации), единицы ее измерения, возможные пределы вариации величины, связь между молярной и объемной долями.
4. Определение величины молярной массы смеси через молярную и массовую концентрацию компонентов.
5. Что такое парциальный объем и парциальное давление смеси?
6. Формулировка закона Дальтона для газовой смеси.
7. Удельная (массовая) теплоемкость, ее единицы измерения.
8. Объемная теплоемкость, ее единицы измерения, связь между объемной и удельной (массовой) теплоемкостями.
9. Молярная теплоемкость, ее единицы измерения, связи между удельной (массовой) и молярной, молярной и объемной теплоемкостями.
10. Изохорная и изобарная теплоемкости, определение величин изохорной и изобарной теплоемкостей через степени свободы одно-, двух-, трех- и более атомных молекул идеального газа.
11. Уравнение Майера, связывающее значения изохорной и изобарной теплоемкостей.
12. Физический смысл универсальной газовой постоянной. Почему единицы измерения универсальной газовой постоянной и молярной теплоемкости одинаковы?
13. Как определить величину удельной (массовой) теплоемкости газовой смеси, если известны массовые концентрации компонентов?
14. Как определить величину объемной теплоемкости газовой смеси, если известны объемные концентрации компонентов?

ТЕМА 3. Законы термодинамики и термодинамические процессы

Сущность первого закона термодинамики. Формулировка первого закона термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Определение работы и теплоты через термодинамические параметры состояния. Внутренняя энергия. Энтальпия. Энтропия. Pv - и Ts -диаграммы. Уравнение первого закона термодинамики для потока.

Методические указания

Следует понять особенности применения в термодинамике общего закона сохранения и превращения энергии. Энергетические изменения, происходящие в термодинамической системе, определяют по изменению параметров рабочего тела, которое является объектом анализа.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет две формы:

$$1) q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv,$$

$$2) q = \Delta h - \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

Следует четко разобраться в разнице понятий «работа расширения» и «располагаемая работа» и уметь дать геометрическую интерпретацию их в p — V -диаграмме.

Уясните принципиальную разницу между внутренней энергией, однозначно определяемой данным состоянием рабочего тела, а также работой и теплотой, которые появляются лишь при наличии процесса перехода рабочего тела из одного состояния в другое и, следовательно, зависят от характера этого процесса. Следует понять разницу между функцией состояния и функцией процесса.

При изучении темы вводится еще одна функция (параметр) состояния, которая называется энтропией. Этот параметр служит лишь для упрощения термодинамических расчетов, а главное, позволяет графически изобразить теплоту, участвующую в процессе, в T — s -диаграмме. Уясните, как из выражения $ds = dq/T$ можно установить знак теплоты, участвующей в процессе. Знание этого вопроса поможет при пользовании T ' s -диаграммой, на которой теплота равна площади под кривой процесса. В диаграмме T — s эта площадь определяет в масштабе количество теплоты, подведенной к рабочему телу (+) ($ds > 0$) или отведенной от него (–) ($ds < 0$).

Уясните, почему для всех процессов, в которых рабочим телом является идеальный газ, всегда $du = CvdT$, а $dh = CpdT$.

Сущность второго закона термодинамики. Основные формулировки второго закона термодинамики. Термодинамические циклы тепловых машин. Прямые и обратные циклы. Термодинамический КПД и холодильный коэффициент. Циклы Карно и анализ их свойств. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии в необратимых

процессах. Изменение энтропии и работоспособность изолированной термодинамической системы. Эксергия теплоты.

Методические указания

Непрерывное получение работы за счет подведения теплоты возможно только в цикле и невозможно в разомкнутом процессе. Поэтому тщательно изучите все вопросы, относящиеся к циклам, особенно к циклу Карно, который имеет большое значение в термодинамике. С его помощью выводят все аналитические зависимости. Формула для К.П.Д. цикла Карно, по существу, также является техническим выражением существа второго закона термодинамики в применении к тепловым машинам. Обратимый цикл Карно при выбранных температурах T_{\max} горячего источника теплоты и T_{\min} холодильника имеет наивысший термический К.П.Д. среди любых других обратимых циклов. Первый закон термодинамики не устанавливает условий, при которых теплота в машине превращается в работу. Это легко уяснить из следующих рассуждений. Если применить уравнение первого закона термодинамики к циклу и проинтегрировать его по замкнутому контуру цикла, то получим $q_u = \oint dq = \oint du + \oint dl_u = 0 + l_u = l_u$, поскольку u — функция состояния. Отсюда вытекает, что теплота, подведенная к рабочему телу в цикле q_u , равна работе, полученной в результате совершения цикла (l_u). Последнее может привести к неверному выводу о полном превращении теплоты в работу цикла, что равносильно возможности создания вечного двигателя второго рода. Это противоречие легко устранить с помощью понятия энтропии как функции состояния. Проинтегрировав выражение $ds = dq/T$ по замкнутому контуру цикла, получим $\oint ds = \oint dq/T = 0$, так как s — функция состояния. Учитывая, что абсолютная температура T не может быть отрицательной, приходим к выводу, что интеграл $\oint dq/T$ может быть равен нулю только в том случае, если на отдельных участках цикла будет неравенство $dq < 0$, т. е. будет осуществляться отвод теплоты. Следовательно, при совершении цикла наряду с подводом теплоты к рабочему телу ($dq > 0$) обязательно должны быть процессы с отводом теплоты ($dq < 0$). Именно это и означает, что подведенную к рабочему телу теплоту в цикле нельзя полностью превратить в работу.

Несмотря на наличие в литературе большого количества формулировок второго закона термодинамики, сущность этого закона сводится к двум положениям:

- 1) теплота не может самопроизвольно переходить от холодного тела к горячему без затраты работы;
- 2) для превращения теплоты в работу в периодически действующей машине необходимо наличие не менее двух источников теплоты — теплоотдатчика (горячего) и теплоприемника (холодного). При этом только часть теплоты, переданной телу от горячего источника, может быть пре-

вращена в работу, остальная часть должна быть отдана холодному источнику.

В отличие от первого закона термодинамики, являющегося абсолютным законом природы, справедливым как для макромира, так и для микромира, второй закон термодинамики таковым не является. Объясняется это тем, что он получен из наблюдений над объектами, имеющими конечные размеры в окружающих нас земных условиях, и не может произвольно распространяться как на бесконечную вселенную, так и на бесконечный микромир.

Если рассматривается изолированная система, состоящая из теплоотдатчика, рабочего тела, совершающего обратимый цикл Карно, и теплоприемника, то:

а) в случае обратимых процессов передачи теплоты (т. е. при бесконечно малой разнице температур) от теплоотдатчика рабочему телу и от него теплоприемнику энтропия системы остается постоянной ($\Delta S_c = 0$);

б) в случае, если один из процессов, например, теплоотдача от источника к рабочему телу, протекает при конечной разнице температур, энтропия системы возрастает ($\Delta S_c > 0$).

Независимо от обратимости процесса энтропия рабочего тела в цикле (как функция состояния) всегда остается неизменной.

Все реальные процессы являются необратимыми, поэтому энтропия изолированной системы, в которой протекают такие процессы, всегда возрастает ($\Delta S_c > 0$). Возрастание энтропии в необратимых процессах само по себе ни о чем не говорит. Однако возрастание энтропии приводит к уменьшению работоспособности изолированной системы. Для количественной оценки потери работоспособности системы вводится понятие удельной эксэргии, под которой понимают максимальную удельную работу, совершаемую системой при ее переходе от данного состояния до равновесия с окружающей средой. Следует понимать, почему потеря эксэргии, ведущая к уменьшению работоспособности системы из-за необратимости процесса, определяется произведением наименьшей температуры системы на приращение энтропии.

Общие методы исследования процессов изменения состояния рабочих тел. Политропные процессы. Основные характеристики политропных процессов. Изображение процессов в координатах Pv и Ts . Основные термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный — частные случаи политропного процесса.

Методические указания

В термодинамике переход рабочего тела из одного равновесного состояния в другое совершается в обратимом термодинамическом процессе. Задание начального и конечного состояний рабочего тела означает полное

знание всех термодинамических параметров состояния начальной и конечной точек процесса. Основная задача исследования термодинамического процесса — определение теплоты (q_{1-2}), участвующей в процессе, и работы изменения объема рабочего тела (l_{1-2}). Такие величины, как изменение внутренней энергии (Δu_{1-2}), энтальпии (Δh_{1-2}) и энтропии (Δs_{1-2}), являются вспомогательными, служащими для решения основной задачи.

Общий метод исследования термодинамических процессов является универсальным, не зависящим от природы тела. Метод базируется на применении уравнения первого закона термодинамики, записанного в двух равнозначных формах:

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + \int_{v_1}^{v_2} p dv = \Delta h_{1-2} - \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

Уясните понятие политропного процесса, под которым понимается любой термодинамический процесс идеального газа с постоянной теплоемкостью (или показателем политропы n) в этом процессе, общность политропного процесса, выраженного уравнением $p v^n = \text{const}$, получая из него уравнение известных основных процессов (изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного). Разберитесь в определении показателя политропы и теплоемкости политропного процесса идеального газа как обобщающих величин, из которых получают частные значения для основных процессов.

Научитесь изображать графически в $p v$ - и $T S$ -диаграммах как основные, так и общие политропные процессы.

Термодинамический анализ процессов в компрессорах. Классификация компрессоров и принцип их действия. Индикаторная диаграмма. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие, полная работа, затрачиваемая на привод компрессора. Многоступенчатое сжатие. Изображение в $P v$ - и $T s$ -диаграммах термодинамических процессов, протекающих в компрессорах. Необратимое сжатие. Относительный внутренний К.П.Д. компрессора.

Методические указания

Из-за широкого распространения в промышленности компрессоров термодинамический анализ их работы имеет большое значение в подготовке инженеров пожарной безопасности. Ознакомившись с конструктивной схемой и работой поршневых и центробежных компрессоров, обратите внимание на то, что процессы всасывания и выталкивания, изображенные на индикаторной диаграмме горизонтальными линиями, нельзя рассматривать как изобарные, так как в этих процессах не происходит изменения состояния, а происходит изменение количества всасываемого или выталки-

ваемого рабочего тела. Уделите внимание изображению термодинамических процессов в pV - и Ts -диаграммах. Сравните изотермическое, адиабатное и политропное сжатие рабочего тела. Уясните влияние вредного пространства на работу поршневого компрессора. В связи с применением высокого давления в некоторых технологических аппаратах разберите принципы работы многоступенчатых компрессоров.

Задачи для самостоятельного решения

3.1. Как и насколько изменяется температура $0,5$ кг кислорода, совершающего при адиабатном расширении работу $L = 1,5$ кДж? Определить изменение внутренней энергии кислорода при данных условиях.

Ответ: $U = -1,5$ кДж; температура понизится на $4,6$ К.

3.2. При изобарном расширении азота была совершена работа 52 кДж. Определить количество теплоты, которое было сообщено газу, а также изменение внутренней энергии азота?

Ответ: $Q = 182$ кДж; $U = 130$ кДж.

3.3. Вычислить конечную температуру двухатомного газа, находящегося в баллоне емкостью $V = 1$ м³ при давлении $P_1 = 0,21$ МПа и температуре $T_1 = 300$ К, если этому газу сообщено количество теплоты $Q_v = 960$ Дж.

Ответ: $T_2 = 317,7$ К.

3.4. Определить увеличение внутренней энергии трехатомного газа, находящегося под давлением $P = 2,0$ бар, если его объем изобарно увеличивается на $1,8$ л. Вычислить также количество теплоты, получаемое газом при этом процессе.

Ответ: $U = 1200$ Дж; $Q = 1560$ Дж.

3.5. Какое количество теплоты сообщено 2 кг кислорода, а также определить конечный объем, если при температуре 30 °С и давлении $P_1 = 0,7$ МПа газ расширяется изотермически до давления $P_2 = 0,12$ МПа?

Ответ: $Q = 277,7$ кДж.

3.6. $1,5$ м³ гелия при 37 °С и давлении $0,25$ МПа сжимается изотермически до давления $1,25$ МПа. Определить конечный объем и выполненную работу в процессе.

Ответ: $L = -603,5$ кДж; $V_2 = 0,3$ м³.

3.7. Каково изменение внутренней энергии $1,1$ кг гелия при изобарном повышении его температуры на 55 К? Вычислить работу, совершенную газом, и сообщенное ему количество теплоты.

Ответ: $L = 125,7$ кДж; $U = 187,7$ кДж; $Q = 313,4$ кДж.

3.8. Давление гелия, находящегося в сосуде объемом $V = 3$ л, после нагревания возросло на $4,2 \cdot 10^5$ Па. Определить количество теплоты, сообщенное газу.

Ответ: $Q = 18,8$ кДж.

3.9. Определить изменение внутренней энергии $0,5$ кг NH_3 , охлаждающегося при $V = \text{const}$, если его начальная температура равна 413 К, а давление в результате охлаждения уменьшилось от 8 МПа до $2,02$ МПа.

Ответ: $U = 212,8$ кДж.

3.10. Определить количество теплоты, сообщенное 7 кг гелия при повышении его температуры на 11 К при $V = \text{const}$. Каковы совершенная газом работа L и изменение его внутренней энергии?

Ответ: $Q = 238,9$ кДж; $U = 238,9$ кДж.

3.11. $2,4$ кг водорода при температуре 10 °С и давлении $0,4$ МПа изотермически расширяется до давления $0,28$ МПа. Определить конечный объем и работу расширения в процессе.

Ответ: $L = 1007,2$ кДж; $V_2 = 4,94$ м³.

3.12. Работа, затрачиваемая на адиабатное сжатие 3 кг азота, составляет 470 кДж. В начальном состоянии давление и температура азота соответственно равны 1 бар и 15 °С. Определить конечную температуру и изменение внутренней энергии.

Ответ: $U = -471$ кДж; $T_2 = 507$ К.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Формулировка закона Бойля-Мариотта, связь между давлением и удельным объемом, график в $P-v$ и $T-s$ координатах.

2. Формулировка закона Шарля, связь между удельным объемом и абсолютной температурой, график в $P-v$ и $T-s$ координатах.

3. Формулировка закона Гей-Люссака, связь между давлением и абсолютной температурой, график в $P-v$ и $T-s$ координатах.

4. Формулировка объединенного газового закона, связь между абсолютной температурой, удельным объемом и давлением идеального газа.

5. Уравнение Менделеева-Клапейрона, связь между давлением, удельным объемом, абсолютной температурой, массой и молярной массой идеального газа.

6. Физический смысл универсальной газовой постоянной, ее связь с постоянной Больцмана и числом Авогадро.

ТЕМА 4. Термодинамика потоков

Основные положения. Уравнения истечения. Располагаемая работа и скорость истечения. Секундный расход при истечении. Связь критической скоростью истечения с местной скоростью распространения звука. Критическое отношение давлений. Расчет скорости истечения и секундного массового расхода для критического режима. Условия перехода через критическую скорость. Сопло Лаваля. Расчет процесса истечения водяного пара с помощью is - диаграммы. Действительный процесс истечения. Термодинамические процессы в газовых установках пожаротушения. Истечение газа из баллона ограниченной вместимости.

Дросселирование газов и паров. Сущность процесса дросселирования и его уравнение. Изменение параметров в процессе дросселирования. Понятие об эффекте Джоуля-Томсона. Особенности дросселирования идеального и реального газов. Понятие о температуре инверсии. Условное изображение процесса дросселирования в is - диаграмме. Практическое использование процесса дросселирования.

Методические указания

Тщательно разберите физический смысл отдельных членов уравнения первого закона термодинамики для потока. Уясните, за счет чего совершаются различные виды работ при течении рабочего тела, почему в суживающихся и цилиндрических каналах скорость потока не может превзойти скорости звука. Разберитесь в воздействии профиля канала на скорость потока и проанализируйте изменение параметров рабочего тела при течении его по соплу Лаваля. Поймите принципиальную разницу в расчете скорости истечения идеального газа и водяного пара. Необходимо отчетливо представлять себе влияние трения на адиабатный процесс истечения идеального газа и водяного пара и уметь изображать реальный процесс истечения в Ts - и hs -диаграммах. Из-за явной необратимости адиабатного процесса дросселирования последний нельзя отождествлять с процессом, протекающим при постоянной энтальпии. Уясните принципиальную разницу между адиабатным дросселированием, при котором $dq = 0$, а $\Delta s > 0$, и адиабатным обратимым процессом расширения рабочего тела, при котором $dq = 0$ и $\Delta s = 0$. Понять, почему в результате дросселирования водяного пара температура его может уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменной.

Задачи для самостоятельного решения

4.1. Определить скорость истечения воздуха из воздуховода с избыточным давлением $2,3 \text{ кПа}$ в помещение с нормальными условиями.

Ответ: $\omega = 58,25 \text{ м/с}$

4.2. Определить скорость истечения CO из трубопровода с давлением $4,5 \text{ МПа}$ в помещение с давлением 770 мм рт. ст. и температурой $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\omega = 318 \text{ м/с}$.

4.3. Определить скорость истечения ацетилена C_2H_2 из трубопровода с избыточным давлением $4,7 \text{ кПа}$ в помещение с давлением $1,1 \text{ ат}$ и температурой 280 К .

Ответ: $\omega = 85,17 \text{ м/с}$.

4.4. Определить скорость истечения этилена C_2H_4 из трубопровода с давлением $4,1 \text{ МПа}$ в помещение с нормальными условиями.

Ответ: $\omega = 304 \text{ м/с}$.

4.5. Определить скорость истечения гелия He из трубопровода с избыточным давлением $5,2 \text{ кПа}$ в помещение с комфортными условиями.

Ответ: $\omega = 246 \text{ м/с}$.

4.6. Определить скорость истечения аргона Ar из трубопровода с давлением $3,3 \text{ МПа}$ в помещение со стандартными условиями.

Ответ: $\omega = 249 \text{ м/с}$.

4.7. Определить величину расхода воздуха, вытекающего с температурой 75°C через отверстие диаметром 8 мм из воздухопровода с давлением 150 кПа в помещение с давлением 730 мм рт. ст. и температурой 310 К .

Ответ: $m = 1,57 \text{ г/с}$.

4.8. Определить величину расхода окиси углерода CO , вытекающего с температурой 400°C через отверстие диаметром 6 мм из трубопровода с давлением $2,4 \text{ МПа}$ в помещение с давлением $0,9 \text{ ат}$ и температурой 5°C .

Ответ: $m = 0,104 \text{ кг/с}$.

4.9. Определить величину расхода гелия, вытекающего с температурой 300°C через отверстие диаметром 7 мм из трубопровода с давлением 290 кПа в помещение со стандартными условиями.

Ответ: $m = 10 \text{ г/с}$.

4.10. Определить величину расхода аргона Ar , вытекающего с температурой 450°C через отверстие диаметром 2 мм из трубопровода с избыточным давлением 20 кПа в помещение с комфортными условиями.

Ответ: $m = 0,0155 \text{ г/с}$.

4.11. Определить расход ацетилена C_2H_2 из трубопровода с избыточным давлением $2,9 \text{ кПа}$ через отверстие диаметром 4 мм в помещение с нормальными условиями.

Ответ: $m = 1,04 \text{ г/с}$.

4.12. Определить величину расхода углекислого газа CO_2 , вытекающего с температурой 95°C через отверстие диаметром 3 мм из воздухопровода с давлением 435 кПа в помещение с давлением $0,85 \text{ ат}$ и температурой 20°C .

Ответ: $m = 7,85 \text{ г/с}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое массовый расход газа, его единицы измерения?
2. Какие бывают режимы истечения, и какие термодинамические параметры определяют режим истечения?
3. Что такое критическое истечение, почему изменение давления газа в пространстве, куда происходит истечение, не будет влиять на критическую скорость и критический массовый расход?
4. Почему равны значения скорости критического истечения и скорости звука при данных условиях?
5. Что такое сопло? Формы сопел для дозвуковых и сверхзвуковых потоков?
6. Что такое диффузор? Формы диффузоров для дозвуковых и сверхзвуковых потоков?
7. Форма сопла Лаваля, использование сопла Лаваля для получения сверхзвуковых потоков.
8. Что такое дросселирование газа?
9. Эффект Джоуля-Томсона. Почему может изменяться температура газа при дросселировании?

ТЕМА 5. Реальные газы и пары. Фазовые переходы

Свойства реальных газов. Пары. Процессы парообразования в Pv - и Ts -диаграммах. Фазовая диаграмма веществ. Термодинамические свойства поверхности раздел фаз. Понятие об уравнении Вукаловича-Новикова. Уравнение Боголюбова-Майера. Термодинамические таблицы воды и водяного пара. Термодинамические диаграммы Pv -, Ts - и is - водяного пара, двуокиси углерода, фреонов. Расчет термодинамических процессов изменения состояния пара. Жидкости и пары, используемые в установках пожаротушения. Жидкости и пары, обращающиеся в технологических установках с повышенной пожарной опасностью.

Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы. Термодинамическое равновесие. Условие фазового равновесия. Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Устойчивость фаз. Фазовые переходы при одинаковых давлениях фаз. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела.

Методические указания

Различие в применении общего метода исследования к идеальным газам и водяному пару обусловлено отсутствием для пара такого простого уравнения состояния, как уравнение Клапейрона для идеального газа, и сложной зависимостью теплоемкости пара от температуры и давления. Поэтому решение основной задачи для идеального газа опирается на аналитические зависимости в то время, как для пара применение общего метода требует использования таблиц или диаграммы hs . Например, в случае изотермического процесса изменения 1 кг рабочего тела общими формулами будут:

$$q_{1-2} = T\Delta s_{1-2} = T(s_2 - s_1), \quad l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}.$$

В случае идеального газа:

$$\Delta s_{1-2} = R \ln v_2 / v_1 = R \ln p_2 / p_1, \quad \Delta u_{1-2} = 0,$$

$$q_{1-2} = RT \ln v_2 / v_1 = RT \ln p_2 / p_1 = l_{1-2},$$

В случае реального газа (пара):

$$\Delta u_{1-2} = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1);$$

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1); \quad l_{1-2} = q_{1-2} - ((i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)),$$

где $s_1, s_2, h_1, h_2, p_1, p_2, v_1, v_2$ берутся из таблиц или снимаются с диаграммы hs для точек, определяющих начальное и конечное состояния пара.

Водяной пар является рабочим телом в современных теплосиловых установках, а также находит широкое применение в различных технологических процессах. Необходимо разобраться в процессе парообразования и уметь изображать этот процесс в pv - и Ts -диаграммах. Параметры водяного пара можно определить по таблицам, а также с помощью hs -диаграммы. Наиболее просто и с достаточной для инженерных расчетов точностью параметры влажного, сухого насыщенного и перегретого паров определяют с помощью hs -диаграммы. Студент должен уяснить принцип работы с hs -диаграммой и научиться определять по ней параметры пара различного состояния. Любая точка на диаграмме hs в области перегретого пара и на кривой сухого насыщенного пара определяет шесть параметров (p, v, T, s, h, u), а любая точка в области влажного пара определяет семь параметров, так как к названным выше параметрам добавляется еще степень сухости $X < 1$. Нужно уметь определять все параметры любой точки на диаграмме hs . Для успешного решения различных задач, связанных с водяным паром, научитесь схематично изображать основные процессы (изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный) в диаграммах pv, Ts и hs .

Задачи для самостоятельного решения

5.1. Манометр, установленный на магистральном трубопроводе стационарной установки парового пожаротушения показывает давление сухого насыщенного пара $0,07$ МПа. С какими параметрами (удельный объем, энтальпия, энтропия, внутренняя энергия) будет поступать пар в распределительный трубопровод, если барометрическое давление равно 750 мм рт. ст.?

Ответ: $v = 1,031$ м³/кг; $i = 2699$ кДж/кг; $s = 7,182$ кДж/(кг·К); $u = 2523,73$ кДж/кг.

5.2. Температура насыщенного пара в магистральном трубопроводе установки парового пожаротушения равна 150 °С. Определить величину давления пара.

Ответ: $P = 0,476$ МПа.

5.3. Для тушения пожара в сушильную камеру объемом 120 м³ подано 10 кг пара с давлением $0,1$ МПа и степенью сухости $0,97$. Определить концентрацию пара в сушильной камере и необходимое количество пара, чтобы его концентрация увеличилась до 35% по объему.

Ответ: $C = 13,69\%$; $m = 15,56$ кг.

5.4. В установку парового пожаротушения водяной пар поступает при давлении $0,14$ МПа и температуре 150 °С. При выходе в помещение пар расширяется по адиабатному процессу до давления $0,099$ МПа. Определить объем пара в конце расширения, если через установку подано 30 кг пара.

Ответ: $V = 54$ м³.

5.5. Для тушения пожара в окрасочной камере предусмотрена установка парового пожаротушения с расходом 10 кг/мин водяного пара с давлением $0,13$ МПа и температуре 140 °С. При входе в камеру пар расширяется по адиабатному процессу до давления $0,1$ МПа. Определить конечную температуру, его энтальпию и количество пара в 1 м³, поступающего в камеру в течение 3 мин.

Ответ: $v = 1,8$ м³/кг; $t = 113$ °С; $i = 2720$ кДж/кг.

5.6. Для аварийного слива жидкости применили водяной пар с давлением $0,2$ МПа и температурой 150 °С. При входе в резервуар, пар расширяется по адиабатному закону до давления $0,12$ МПа. Определить объем пара в конце расширения, если трубопровод подано 45 м³ при начальных параметрах.

Ответ: $V = 67,27$ м³.

5.7. Ниже какой температуры углекислый газ можно перевести в жидкое состояние?

Ответ: $t < 31,04$ °С.

5.8. Может ли быть переведен в жидкое состояние аммиак при комфортной температуре?

Ответ: Можно.

5.9. Сколько тепла необходимо отвести от 1 кг углекислого газа, чтобы при давлении 4,506 МПа его превратить в жидкость? Начальная температура соответствует комфортным условиям.

Ответ: $Q = 209,55 \text{ кДж/кг}$.

5.10. Каково давление насыщенного пара углекислоты при температуре $-10 \text{ }^\circ\text{C}$?

Ответ: $P = 0,2909 \text{ МПа}$.

5.11. Давление насыщенного пара в углекислотном огнетушителе при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ равно 5,733 МПа. В результате выпуска пара при тушении пожара давление в огнетушителе понизилось до 0,555 МПа. Какая в этот момент установится температура жидкой и паровой фаз?

Ответ: $t = -55 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.12. Сколько тепла необходимо отвести от 1 кг сухого насыщенного пара углекислоты при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ и температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, чтобы превратить его в жидкость.

Ответ: $Q_1 = 155,3 \text{ кДж/кг}$; $Q_2 = 303 \text{ кДж/кг}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при больших давлениях и небольших температурах свойства реального газа отличаются от идеального?

2. Состояние каких газов и при каких условиях описывает уравнение Ван-дер-Ваальса?

3. Какими процессами в газе характеризуется режим насыщения?

4. Что характеризует степень сухости? Ее единицы измерения?

5. Чему равна степень сухости пара при критической температуре?

6. Можно ли превратить газ в жидкость сжатием при температуре больше критической?

7. Что такое "перегретый" пар, способы его получения и области применения?

8. Могут ли протекать одновременно изобарный и изотермический процесс с реальными газами?

9. Что характеризует удельная теплота парообразования вещества?

10. Как связаны между собой величина удельной теплоты парообразования и скорость нарастания давления по температуре в закрытом сосуде?

ТЕМА 6. Термодинамический анализ циклов теплотехнических устройств. Общие методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок

Циклы паросиловых установок. Принципиальная схема паросиловой установки. Цикл Ренкина и его использование. Влияние начальных и конечных параметров на термический К.П.Д. цикла Ренкина. Изображение цикла Pv -, Ts - и is - диаграммах. Пути повышения экономичности паросиловых установок. Теплофикационный цикл. Понятие о циклах атомных силовых установок.

Методические указания

Циклы паросиловых установок являются основой теплоэнергетики. Поэтому повышению эффективности паросиловых установок в настоящее время уделяется большое внимание. Прежде всего, необходимо изучить историю развития теории циклов паросиловых установок, ее современное состояние и перспективы развития. Особое внимание уделите основному циклу паросиловой установки. Разберите принципиальную схему установки. За основной цикл принят идеальный цикл Ренкина. В этом цикле осуществляется полная конденсация рабочего тела в конденсаторе, поэтому для подачи питательной воды в паровой котел вместо громоздкого малоэффективного компрессора используется питательный насос, который имеет малые габариты и высокий К.П.Д. Исследование основного цикла осуществляется с помощью pv -, Ts и hs -диаграмм. Умение анализировать циклы с помощью диаграмм является обязательным. Разберите вывод уравнения для определения термического К.П.Д. цикла Ренкина. Исследование термического К.П.Д. при различных начальных и конечных состояниях пара позволяет понять, что увеличение начального давления и температуры, а также снижение давления в конденсаторе приводят к росту К.П.Д. паросиловой установки и в итоге – значительной экономии топлива. Повышение К.П.Д. достигается путем изменений в самом цикле. Эти изменения приводят к созданию циклов, из которых наибольший интерес представляют: со вторичным перегревом пара, регенеративный, парогазовый и бинарные.

Несмотря на снижение термического К.П.Д. в теплофикационном цикле, метод комбинированной выработки тепловой энергии является наиболее прогрессивным. Комбинированное производство теплоты и электроэнергии значительно снижает расходы топлива по сравнению с раздельной выработкой, поэтому развитие теплофикации имеет большое значение. При изучении темы ознакомьтесь с общими понятиями термодина-

мических циклов атомных установок. Строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах — дальнейшее развитие атомной энергетики.

Циклы двигателей внутреннего сгорания (Д.В.С.). Принцип действия поршневых Д.В.С. Циклы с изохорным и изобарным подводом тепла. Цикл со смешанным подводом теплоты. Изображение циклов в Pv - и Ts - диаграммах. Термические и эксергические К.П.Д. циклов Д.В.С. Сравнительный анализ термодинамических циклов Д.В.С.

Циклы установок для газодводяного тушения пожаров.

Циклы холодильных установок. Холодильный коэффициент и холодопроизводительность. Цикл паровой и воздушной компрессорной холодильной установки. Понятие об абсорбционных и парожжекторных холодильных установках. Термотрансформаторы.

Методические указания

Термодинамический анализ циклов двигателей внутреннего сгорания проводится при допущении термодинамической обратимости процессов, составляющих цикл. Для простоты анализа циклов Д.В.С. в качестве рабочего тела принимают идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Разность температур между источником теплоты и рабочим телом считают бесконечно малой, а подвод теплоты к рабочему телу осуществляют от внешних источников теплоты, а не за счет сжигания топлива. Следует научиться анализировать различные циклы, пользуясь при этом pV - и TS -диаграммами. При рассмотрении действительных процессов обратите внимание на отличие индикаторных диаграмм от теоретического идеального цикла. Проанализируйте уравнение для определения термического К.П.Д. различных циклов и влияние основных параметров на термический К.П.Д.

Разберитесь в экономичности циклов Д.В.С. При сравнении экономичности рассматриваемых циклов при одинаковых степенях сжатия следует помнить, что наиболее экономичным будет цикл с изохорным подводом теплоты. Если же сравнение экономичности производить при одинаковых максимальных давлениях и температурах, то максимальный К.П.Д. имеет цикл с изобарным подводом теплоты, а наименьший — цикл с изохорным подводом теплоты.

При рассмотрении газотурбинных установок (ГТУ) обратите внимание на преимущества их перед поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Уясните принцип работы газотурбинных установок, запомните схемы установок и научитесь анализировать их работу, используя PV - и $T's$ -диаграммы. Поймите принцип получения уравнения термического К.П.Д., внутреннего относительного К.П.Д. и эффективного К.П.Д. газотурбинных установок, обратите внимание на физический смысл этих понятий. Запом-

ните, что при сравнении циклов ГТУ при различных степенях повышения давлений и одинаковых максимальных температурах наибольший К.П.Д. имеет цикл с изобарным подводом теплоты. Разберите методы повышения термического К.П.Д. и запомните, что регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты значительно повышают К.П.Д. газотурбинной установки, а идеальный цикл при этом приближается к обобщенному циклу Карно.

Задачи для самостоятельного решения

6.1. В конденсационной турбине начальное давление пара $3,5 \text{ МПа}$ и начальная температура пара $435 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление пара в конденсаторе 4 кПа , а количество конденсирующего пара 12 кг/с . Определить количество тепла, отдаваемое паром в конденсаторе турбины, если относительный внутренний коэффициент полезного действия турбины $0,76$.

Ответ: $Q = 27,444 \text{ МВт}$.

6.2. Паротурбинная установка мощностью 6 МВт работает при начальном давлении пара $3,43 \text{ МПа}$ и температуре $435 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление пара в конденсаторе $3,92 \text{ кПа}$. Определить часовой расход и массу трехсуточного запаса топлива с теплотой горения $39,74 \text{ МДж/кг}$, коэффициент полезного действия котельной установки $0,8$.

Ответ: $m = 2399,36 \text{ кг/час}$; $M = 172,753 \text{ т}$.

6.3. Определить величину термических коэффициентов полезного действия двух паротурбинных установок мощностью по 25 МВт каждая. Одна работает при начальном давлении пара $3,43 \text{ МПа}$ и температуре $435 \text{ }^\circ\text{C}$, вторая при начальном давлении $8,82 \text{ МПа}$ и температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление отработавшего пара в обеих турбинах одинаково и равно 5 кПа .

Ответ: $\eta_1 = 0,383$; $\eta_2 = 0,409$.

6.4. Газотурбинная установка переносной мотопомпы с подводом тепла при постоянном давлении и полной регенерации. Определить, на сколько процентов экономичнее цикл газотурбинной установки с регенерацией, чем без регенерации, при начальной температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, конечной температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$, степень повышения давлений 6 . Рабочее тело — воздух.

Ответ: на $54,16\%$.

6.5. Газовая турбина, работающая по циклу с подводом теплоты при постоянном давлении, используется в качестве двигателя на мотопомпе. Определить термический коэффициент полезного действия турбины, количество подводимой и отводимой теплоты и работу цикла. Известно, что начальное давление равно $0,1 \text{ МПа}$, начальная температура $40 \text{ }^\circ\text{C}$, степень повышения давления равно 9 , степень предварительного расширения $1,5$.

Рабочее тело — 1 кг воздуха сжимается и расширяется по адиабате с показателем 1,4.

Ответ: $\eta = 0,466$; $q_1 = 308,1$ кДж/кг; $q_2 = 164,5$ кДж/кг;
 $l_u = 143,6$ кДж/кг.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему адиабатный, изобарный, изохорный и изотермический процессы являются частными случаями политропного процесса?
2. Что такое термодинамический цикл? Почему график термодинамического цикла в P - v координатах носит замкнутый характер?
3. Что такое прямой цикл? Привести примеры тепловых машин, использующих прямой цикл.
4. Что такое обратный цикл? Привести примеры тепловых машин, использующих обратный цикл.
5. Что такое цикл Карно? В чем принципиальное отличие цикла Карно от всех других циклов?
6. Что такое коэффициент полезного действия цикла тепловой машины, его единицы измерения и пределы изменения? Графическая интерпретация К.П.Д. цикла тепловой машины в P - v и T - s координатах?

ТЕМА 7. Теплогенерирующие устройства, холодильная и криогенная техника

Общая характеристика теплосиловых установок. Технологические промышленные печи. Промышленные котельные установки. Паровые и газовые турбины. Двигатели внутреннего сгорания. Тепловые электростанции. Основные положения расчета теплосиловых устройств.

Физическая сущность процессов охлаждения. Основы получения искусственного холода. Классификация холодильных машин и установок. Холодильные агрегаты и их основные характеристики. Холодопроизводительность установки.

Основы криогенной техники. Воздухоразделительные установки. Гелиевые и водородные системы. Системы хранения и транспортировки криогенных веществ.

Методические указания

Холодильные установки работают по обратному циклу. Знание классификации и принципиальных схем холодильных установок позволяет правильно выбирать соответствующий тип холодильной установки при расчете охлаждения. Несмотря на то, что воздушные холодильные установки в промышленности используют редко, изучение схемы и принципа действия такой установки позволит студенту изучить термодинамические основы холодильного цикла. Усвоив учебный материал темы, студент сможет анализировать с помощью Ts -диаграммы работу холодильных циклов, определять холодильные коэффициенты и холодопроизводительность установок. Особое внимание обратите на работу паровой компрессорной

холодильной установки, получившей наибольшее распространение в промышленности. Уясните принципиальное отличие паровых компрессорных установок от воздушных. Запомните, что в паровой компрессорной холодильной установке не применяется расширительный цилиндр (детандер), а рабочее тело дросселируется в регулировочном вентиле. Несмотря на то, что это приводит к потере холодопроизводительности, замена упрощает установку и дает возможность легко регулировать давление пара и получать низкую температуру в охладителе. По обратному циклу работают не только холодильные машины, но и тепловые насосы, в которых теплота, забираемая от окружающей среды, с помощью затраченной работы повышает энергетический уровень рабочего тела и при более высокой температуре отдается внешнему потребителю. Уясните понятие коэффициента теплоиспользования и разберите принципиальную схему и работу теплового насоса.

Задачи для самостоятельного решения

7.1. Определить мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество тепла, передаваемое окружающей среде, если температура в охлаждаемом помещении $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Холодопроизводительность воздушной холодильной машины 1000 МДж/час . Давление воздуха на выходе из компрессора $0,5\text{ МПа}$, а в холодильной камере $0,1\text{ МПа}$.

Ответ: $N = 162,2\text{ кВт}$; $G = 12652\text{ кг/час}$; $\varepsilon = 1,712$; $Q = 1583,\text{ МДж}$.

7.2. Какой мощности двигатель необходимо поставить на холодильную машину, если температура в холодильной камере равна $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, холодопроизводительность 500 МДж/час . Максимальное давление воздуха в установке $0,55\text{ МПа}$, минимальное давление $0,11\text{ МПа}$.

Ответ: $N = 81,25\text{ кВт}$.

7.3. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки равна 100 МДж / час . Максимальное давление $0,55\text{ МПа}$, минимальное давление $0,11\text{ МПа}$, температура воздуха в начале сжатия $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при выходе из охладителя $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сжатие и расширение воздуха происходит по политропе с показателем $1,25$. Определить холодильный коэффициент установки и потребную теоретическую мощность двигателя.

Ответ: $\varepsilon = 2,63$; $N = 10,54 \text{ кВт}$.

7.4. Компрессор аммиачной холодильной установки имеет мощность 50 кВт . Из компрессора сухой насыщенный пар аммиака при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$ направляется в конденсатор, после которого жидкость расширяется в дроссельном вентиле с энтальпией 1557 кДж/кг . Температура испарения аммиака в охлаждаемой среде $-13 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить холодопроизводительность установки.

Ответ: $Q = 289,87 \text{ кВт}$.

7.5. Паровая компрессорная холодильная установка работает на аммиаке с температурой испарения $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Из испарителя выходит сухой насыщенный пар. Температура конденсации пара равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$, энтальпия 1542 кДж/кг . Сконденсированный аммиак охлаждается дросселированием. Определить холодильный коэффициент установки.

Ответ: $\varepsilon = 6,407$.

7.6. Для отопления здания может быть использован тепловой насос, в результате работы которого тепло передается источнику с более высокой температурой, чем окружающая среда. Сколько тепла может передавать тепловой насос, если окружающая среда имеет температуру $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, температура отопительных поверхностей $25 \text{ }^\circ\text{C}$? Мощность двигателя компрессора 20 кВт , холодильный реагент — аммиак.

Ответ: $Q = 163,4 \text{ кВт}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По какому циклу работают холодильные установки?
2. Какой параметр характеризует эффективность работы холодильной установки?
3. Какой цикл является наиболее эффективным применительно к работе холодильной установки?
4. Как называются машины, используемые в холодильных установках для расширения и охлаждения рабочего тела?
5. Какие требования предъявляются к веществам, используемым в качестве хладагентов?
6. Перечислите достоинства и недостатки воздушных холодильных установок.
7. Перечислите достоинства и недостатки пароконпрессорных холодильных установок?
8. Как происходит расширение рабочего тела в пароконпрессорных холодильных установках?

ТЕМА 8. Химическая термодинамика.

Топливо и основы горения

Термохимия. Закон Гесса. Уравнения Кирхгофа. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Константа равновесия и степень диссоциации. Тепловой закон Нернста.

Виды топлива и их характеристики. Классификация топлив. Твердое, жидкое и газообразное топливо и их характеристики. Элементарный состав топлива. Теплота сгорания.

Основные положения теории горения. Особенности сжигания твердого, жидкого и газообразных топлив и расчет теоретически необходимого количества воздуха для их сжигания. Коэффициент избытка воздуха. Состав объем продуктов сгорания.

Теоретическая температура горения.

Методические указания

В топку можно подавать заранее подготовленную газоздушную смесь, а можно вдувать горючий газ и воздух отдельно. Сжигание подготовленной смеси называется кинетическим, поскольку оно определяется только кинетикой реакций горения. В соответствии с законом Аррениуса (1889 г.) скорость реакции сильно (по экспоненте) возрастает с температурой, поэтому при высоких температурах, обычных для топочных камер, такая смесь может сгорать с огромной скоростью. Предварительно подготовленную смесь сжигают и в карбюраторных двигателях внутреннего сгорания, где горение должно завершиться за ничтожно малое время.

В промышленных топках и печах такой большой скорости сгорания обычно не требуется. В то же время подготовленная смесь чрезвычайно взрывоопасна. Она может взорваться от электрической искры (как в цилиндре карбюраторных Д.В.С.), при проскоке пламени через горелку из топки и просто при нагреве до определенной температуры, называемой температурой самовоспламенения.

Надо обратить внимание, что не всякую смесь можно поджечь даже от постороннего источника (например, электрической искры). Различают нижний (бедная смесь) и верхний (богатая смесь) концентрационные границы зажигания. Вне этих пределов

смесь невозможно зажечь, т. е. она пожаро- и взрывобезопасна (надо иметь в виду, что богатая топливом смесь, вытекая в воздух и разбавляясь им, станет пожароопасной). Предельные концентрации зажигания приведены в теплофизическом справочнике.

Учитывая взрывоопасность готовой смеси, в промышленных установках предпочитают без особой необходимости не иметь с нею дела, подавая горючий газ в топку отдельно от воздуха. В отличие от кинетического такое горение называется диффузионным, поскольку скорость его сгорания определяется интенсивностью смешения компонентов, осуществляемого в конечном счете путем взаимной диффузии.

Задачи для самостоятельного решения

8.1. Газовый анализ продуктов сгорания антрацитового штыба обнаружил 1% CO. Оценить приблизительно химический недожег (имейте в виду, что все газоанализаторы дают содержание компонентов в сухом газе).

8.2. При испытании котла или печи, работающей на твердом топливе, отдельно определяют содержание горючих (в процентах массы) и шлака, а также доли золы, проваливающейся сквозь отверстия решетки (в слоевых топках) сбрасываемой с решетки в виде шлака и уносимой газами.

8.3. Какое количество воздуха должен инжектировать 1 м^3 природного газа, чтобы горение протекало при коэффициенте избытка воздуха равным 1,2?

8.4. На какой способ сжигания бурого угля лучше всего ориентировать топку котла мощностью 150 МВт ?

8.5. На электрической станции для привода турбины мощностью 1200 МВт предусмотрен котел. Определить примерный объем его топки, если коэффициент полезного действия равен 40%.

8.6. В вентиляционном воздухе, выходящем из угольной шахты, содержится 5% (объемных) метана. Рассчитать, нужно ли подмешивать к этой смеси дополнительный воздух для сжигания метана с коэффициентом избытка равным 1,2, и если нужно, то сколько. Как изменилась бы ситуация, если бы вместо метана был бы сжиженный газ?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловой эффект химической реакции? Какие идеализированные тепловые эффекты используются при исследовании химических процессов термодинамическими методами?

2. Какому процессу фазового перехода аналогична химическая реакция? Привести графическое изображение процесса в P-v и T-s координатах.

3. Написать уравнение, выражающее зависимость тепла в изобарно-изотермической реакции от температуры. Какие составляющие входят в это уравнение? Как называется это уравнение?
4. Привести математическую форму закона действующих масс для случая химического равновесия.
5. Привести правило Ле-Шателье-Брауна, привести пример его использования.
6. Можно ли экспериментально определить величину теплоемкости при температурах, близких к абсолютному нулю? Подробно пояснить ответ.
7. Дать определение закона В. Нернста, позволяющее определять абсолютные (т. е. отсчитанные от 0 К) значения энтропии веществ.
8. Что такое теплота горения, в каких единицах она измеряется?
9. Что такое высшая и низшая теплоты горения, как связаны между собой высшая и низшая теплоты горения?
10. Входят ли кислород и азот в состав горючих элементов рабочего топлива? Как влияет содержание кислорода и азота на величину удельной теплоты горения?

2. ТЕОРИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ТЕМА 9. Основные понятия и определения теории теплообмена

Предмет и задачи теории теплообмена. Значение теплообмена в промышленных процессах. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты: теплопроводность, конвекция и излучение. Сложный теплообмен. Актуальные задачи противопожарной защиты объектов народного хозяйства, которые решаются с использованием теории теплообмена.

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.

Задачи для самостоятельного решения

9.1. Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена из дитомитого кирпича ($\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Ответ: $q = 22 \text{ Вт/м}^2$.

9.2. Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной 50 мм составляет 70 Вт/м^2 . Определить разность температур на поверхностях стенки и градиент температуры в стенке, если она выполнена из красного кирпича.

Ответ: $\Delta t = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$; $\text{grad } t = -100 \text{ }^\circ\text{C/м}$.

9.3. Определить потерю тепла через стенку из красного кирпича длиной 5 м и высотой 4 м и толщиной 250 мм, если температуры на поверхностях стенки поддерживаются 110 °С и 40 °С.

Ответ: $Q = 3920 \text{ Вт}$.

9.4. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпичей, между которыми расположена засыпка из диатомита. Толщина шамотного слоя 120 мм, диатомитовой засыпки 50 мм и красного кирпича 250 мм. Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку оставался неизменным?

Ответ: $\delta = 500 \text{ мм}$.

9.5. Стенка неэкранированной топочной камеры парового котла выполнена из слоя пеношамота толщиной 125 мм и слоя красного кирпича толщиной 500 мм. Слои плотно прилегают друг к другу. Вычислить тепловые потери через 1 м² стенки топочной камеры и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

Ответ: $q = 1090 \text{ Вт/м}^2$; $t_{w2} = 828 \text{ °С}$.

9.6. Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной 250 мм и слоя строительного войлока. Температуры на внешней поверхности кирпичного слоя 110 °С и на внешней поверхности войлока 25 °С. Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и найти толщину войлочного слоя при условии, чтобы тепловые потери через 1 м² стенки камеры не превышали 110 Вт/м².

Ответ: $t_{w2} = 71 \text{ °С}$; $\delta_2 = 19 \text{ мм}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое температурное поле, способы его задания?
2. Что такое изотермическая поверхность, примеры?
3. Что такое тепловой поток, его единицы измерения в СИ?
4. Что такое плотность теплового потока, ее единицы измерения в СИ?
5. Что такое градиент температуры, его физические аналоги и единицы измерения в СИ?

ТЕМА 10. Теплопроводность

Основные понятия и определения. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Механизм передачи теплоты в металлах, диэлектриках, полупроводниках, жидкостях и газах. Дифференциальное уравнение теп-

лопроводности. Условие однозначности. Коэффициент температуропроводности.

Теплопроводность при стационарном режиме. Решение уравнения теплопроводности для однослойной и многослойной плоской, цилиндрической и сферической стенок при граничных условиях первого рода при постоянном коэффициенте теплопроводности. Расчет температурного поля стенки с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

Теплопроводность при нестационарном режиме. Нестационарный процесс теплопроводности. Методы решения задач нестационарной теплопроводности: метод разделения переменных, метод интегрального преобразования Фурье, метод Лапласа. Метод конечных разностей.

Охлаждение (нагревание) неограниченной пластины, цилиндра и шара при граничных условиях первого, второго, третьего рода. Нестационарный процесс теплопроводности в телах конечных размеров. Регулярные режимы.

Физические особенности процессов нагревания строительных конструкций и технологического оборудования при пожаре и испытаниях строительных конструкций в печах. Воздействие горячих газов на датчики пожарных извещателей. Математическая постановка задач о нагревании тел в условиях реального и стандартного пожаров. Численные методы расчета температурного поля в строительных конструкциях при граничных условиях, изменяющихся со временем.

Методические указания

Нужно понять значение закона Фурье для решения 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 первого рода, получают решение по распространению температуры внутри тела, а применяя граничное условие третьего 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 1 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.

Задачи для самостоятельного решения

10.1. Во сколько раз уменьшаются теплотери через стенку здания, если между двумя слоями кирпичей толщиной по 250 мм установить прокладку пенопласта толщиной 50 мм, $\lambda_k = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_n = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Ответ: в 2 раза.

10.2. Определить допустимую толщину слоя накипи богатой известью, отложившейся на поверхности стенки барабана котла, с тем, чтобы температура на поверхности стенки не превышала 700°C . Толщина листовой углеродистой стали 20 мм. Температура слоя накипи со стороны пара равна 250°C . Плотность теплового потока равна $35 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Плотность накипи равна $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $\delta = 0,105 \text{ мм}$.

10.3. Определить температуру на наружной поверхности стального трубопровода, внутренний диаметр которого равен 35 мм, наружный 38 мм. Температура на внутренней поверхности паропровода равна 170°C . Плотность теплового потока на 1 погонный метр паропровода равна $300 \text{ Вт}/\text{м}$.

Ответ: $t = 169,914^\circ\text{C}$.

10.4. Паропровод, внешний диаметр которого равен 150 мм, покрыт двухслойной изоляцией. Внутренний слой толщиной 50 мм — стеклянная вата, наружный — цементный раствор, коэффициент теплопроводности которого $0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и толщина 10 мм. Температура стенки паропровода 170°C , тепловой поток через 1 погонный метр паропровода $130 \text{ Вт}/\text{м}$. Определить температуру на границе соприкосновения слоев и температуру на внешней поверхности теплоизоляции.

Ответ: $t_2 = 51 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_3 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.5. Через противопожарную преграду проходит стальной стержень, боковая поверхность которого тщательно теплоизолирована, т. е. стержень представляет полуограниченное тело. Торцев стержня нагревается до температуры $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, которая затем остается постоянной. Начальная температура стержня равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить температуру стержня на выходе из стены толщиной 25 см в смежное помещение через 45 минут после начала нагрева.

Ответ: $t_{x,\tau} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.6. Плита перекрытия толщиной 200 мм изготовлена из бетона на гранитном щебне. Плита нагревается с одной стороны в условиях «стандартного» пожара. Начальная температура равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить температуру в плите на глубине 3 см через 90 минут после начала теплового воздействия.

Ответ: $t_{x,\tau} = 525 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.7. Определить температуру на поверхности дощатой перегородки толщиной 7 см в противопожарной отступке через 3 часа теплового воздействия, если температура поверхности стенки в отступке равна $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Пусть размеры поверхностей теплообмена велики по сравнению с расстоянием между ними.

Ответ: $t_{w2} = 131 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.8. Железобетонная плита перекрытия толщиной 20 см изготовлена из песчаного бетона. В плите на глубине $2,5 \text{ см}$ от поверхности заложена стальная арматура. Начальная температура равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$. В условиях пожара с одной стороны плиты температура продуктов горения внезапно повышается до температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее остается постоянной. Определить время, по истечению которого температура на арматуре достигнет $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\tau = 1,16 \text{ часа}$.

10.9. Биметаллическая пластина извещателя изготовлена из сплава латунь-инвар. Линейные размеры пластины значительно больше ее толщины. Начальная температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Внезапно температура окружающей среды повышается до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, которая в дальнейшем остается постоянной. Определить время, по истечении которого температура в середине пластины повысится до $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\tau = 0,0086 \text{ часа}$.

10.10. Длинная стальная балка прямоугольного сечения с размерами поперечного сечения $400 \times 320 \text{ мм}$ в начальный момент времени имела температуру $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем была помещена для охлаждения в среду с температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи с поверхности балки в процессе охлаждения оставался постоянным и равным $170 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Рассчитать температуру по оси балки через 2 часа после начала охлаждения.

Ответ: $t = 182 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.11. Определить время, необходимое для нагрева листа стали толщиной 24 мм, который имел начальную температуру $25 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем помещен в печь с температурой $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагрев считать законченным, когда температура на оси листа достигнет величины $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $t_{\text{хт}} = 45 \text{ мин}$.

10.12. Стальной цилиндр диаметром 500 мм охлаждается в среде, имеющей постоянную температуру $15 \text{ }^\circ\text{C}$. В начальный момент времени температура цилиндра была всюду одинакова: $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи во всех точках поверхности цилиндра в процессе охлаждения оставался постоянным и равным $160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Определить количество тепла, которое будет отдано 1 погонным метром цилиндра окружающей среде в течение 3 часов после начала охлаждения.

Ответ: $Q = 297 \text{ МДж}/\text{м}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое коэффициент теплопроводности, его единицы измерения в СИ?
2. От чего может зависеть величина коэффициента теплопроводности вещества?
3. Может ли коэффициент теплопроводности вещества иметь отрицательное значение?
4. Формулировка и математическая интерпретация закона Ж. Фурье.
5. Как изменятся тепловые потери через цилиндрическую стенку при увеличении ее толщины?
6. Что такое температурный коэффициент теплопроводности, его единицы измерения в СИ?
7. Может ли температурный коэффициент теплопроводности вещества иметь отрицательное значение?
8. Какие факторы влияют на точность измерения коэффициента теплопроводности?
9. Можно ли снимать показания приборов до выхода установки на стационарный режим прогрева образца?
10. Как влияет на точность измерения коэффициента теплопроводности соотношение между длиной образца и диаметром?
11. Какие процессы в теплопередаче можно считать стационарными, какие нестационарными?
12. Что такое граничные условия, начальные условия, краевые условия, соотношение между ними?

13. Известные и неизвестные величины при решении задачи теплопроводности в граничных условиях первого рода.

14. Известные и неизвестные величины при решении задачи теплопроводности в граничных условиях второго рода.

15. Известные и неизвестные величины при решении задачи теплопроводности в граничных условиях третьего рода.

16. Какие физические свойства материала характеризует коэффициент температуропроводности, его единицы измерения в СИ?

17. Является ли $m^2/час$ единицей измерения в СИ?

18. Как связаны между собой коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материалов?

19. Может ли зависеть ли величина коэффициента температуропроводности материала от температуры прогрева образца?

20. Какое тело можно считать полуограниченным при решении задач нестационарной теплопроводности?

21. Написать уравнение нестационарной теплопроводности для полуограниченного тела в граничных условиях первого рода.

22. В каких пределах может изменяться аргумент функции ошибок Гаусса?

23. При каких условиях можно использовать уравнение нестационарной теплопроводности в граничных условиях первого рода для расчета тепловых режимов работы строительных конструкций на пожаре?

24. В каких пределах может изменяться значение функции ошибок Гаусса?

25. Как связаны между собой значение функции ошибок Гаусса и ее аргумент?

ТЕМА 11. Конвективный теплообмен

Основные понятия и определения. Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Дифференциальные уравнения теплообмена: уравнение движения вязкой жидкости (Навье-Стокса), уравнение теплопроводности для потока движущейся жидкости, уравнение теплоотдачи на границе потока и стенки (Био-Фурье), уравнение неразрывности. Условия однозначности к дифференциальным уравнениям конвективного теплообмена. Основные положения теории пограничного слоя. Исследование теплоотдачи методами пограничного слоя.

Основы теории подобия. Основные определения. Условия подобия физических явлений. Преобразования подобия. Числа подобия. Критериальные уравнения. Физический смысл основных чисел подобия. Методы моделирования. Понятия о математическом моделировании.

Теплоотдача при вынужденном движении среды. Теплообмен при движении жидкостей вдоль плоской поверхности; теплоотдача при ламинарном и турбулентном пограничном слое; решение задач методом теории подобия; критериальные уравнения.

Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах; теплоотдача при ламинарном и турбулентном течении жидкостей в трубах; расчетные уравнения подобия.

Теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб, коридорно- и шахматно расположенных. Критериальные уравнения.

Теплоотдача при свободном движении жидкости. Теплоотдача в неограниченном объёме: ламинарная и турбулентная конвекция у вертикальных поверхностей. Теплоотдача на горизонтальной плоской поверхности в неограниченном пространстве. Теплоотдача горизонтально расположенного цилиндра в неограниченном объёме. Критериальные уравнения. Теплообмен при свободной конвекции в замкнутых объёмах. Расчет теплоотдачи через тонкие прослойки жидкости и газа.

Теплообмен при изменении агрегатного состояния. Теплообмен при кипении. Механизм процесса при пузырьковом и плёночном режимах кипения. Кризисы кипения. Теплоотдача при пузырьковом и плёночном кипении жидкости в большом объёме. Расчетные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи. Вопросы противопожарной безопасности устройств и аппаратов, в которых реализуются процессы кипения жидкостей. Теплоотдача при взаимодействии струи капельной жидкости и пластины с кипением на поверхности.

Теплообмен при конденсации. Пленочная и капельная конденсация. Теплоотдача при конденсации чистых паров. Расчетные уравнения коэффициента теплоотдачи для вертикальных и горизонтальных труб. Влияние примесей неконденсирующихся газов на теплоотдачу. Расчет необходимого расхода водяного пара при проектировании систем пожаротушения.

Методические указания

При решении задачи стационарной теплопроводности при граничных условиях третьего 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 и 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:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot Gr^v \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0.25},$$

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 $Gr \rightarrow 1$ и $Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0.25}$, а при свободной конвекции $Re \rightarrow 1$ и $Nu = A_1 \cdot Gr^n \cdot Pr^m \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0.25}$. Поймите необходимость введения в критериальное уравнение множителя $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0.25}$, 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.

Задачи для самостоятельного решения

11.1. Тонкая пластина длиной 2 м и шириной 1,5 м обтекается продольным потоком воздуха. Скорость набегающего потока равна 3 м/с, а температура 20 °С. Температура поверхности пластины 90 °С.

Ответ: $\alpha = 4,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); Q = 2050 \text{ Вт}$.

11.2. Тонкая константовая лента сечением 0,1×5 мм нагревается электрическим током силой 20 А. Электрическое сопротивление 1 погонного метра ленты равно 1 Ом/м. Лента обтекается продольным потоком воды. Скорость набегающего потока равна 0,5 м/с, температура воды 10 °С. Определить температуру лены на расстоянии 200 мм от передней кромки.

Ответ: $t = 81,6 \text{ °С}$.

11.3. Вычислить средний коэффициент теплоотдачи при течении трансформаторного масла в трубе диаметром 8 мм и длиной 1 м, если средняя по длине трубы температура масла 80 °С, средняя температура стенки трубки 20 °С и скорость масла 0,6 м/с.

Ответ: $\alpha = 138 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

11.4. По трубке диаметром 6 мм движется вода со скоростью 0,4 м/с. Температура стенки трубки равна 50 °С. Какую длину должна иметь трубка, чтобы при температуре воды на входе 10 °С температура на выходе была 20 °С.

Ответ: $l = 760 \text{ мм}$.

11.5. По трубке диаметром 6 мм и длиной 1600 мм течет вода с расходом 15 кг/час. Трубка обогревается так, что плотность теплового потока на ее внутренней поверхности можно принять постоянной. Температура воды на входе в трубку равна 20 °С. До какого значения можно поднять тепловую нагрузку, если температура на внутренней поверхности трубки не должна превышать 100 °С?

Ответ: $q = 36,5 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

11.6. Цилиндрическая трубка диаметром 20 мм охлаждается поперечным потоком воды. Скорость потока равна 1 м/с. Средняя температура воды 10 °С и температура поверхности трубки 50 °С. Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки к охлаждающей воде.

Ответ: $\alpha = 7050 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

11.7. Труба с внешним диаметром 25 мм охлаждается поперечным потоком трансформаторного масла. Скорость движения равна 1 м/с, а средняя температура масла равна 20 °С. Определить, какую температуру поверхности трубы необходимо поддерживать, чтобы плотность теплового потока составляла 45 кВт/м².

Ответ: $t_w = 70 \text{ °С}$.

11.8. Вычислить потери тепла за единицу времени с 1 м² поверхности горизонтального теплообменника, корпус которого имеет цилиндрическую форму и охлаждается свободным потоком воздуха. Наружный диаметр корпуса теплообменника 400 мм; температура поверхности 200 °С, температура воздуха в помещении 30 °С.

Ответ: $q = 1 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

11.9. В котельной проложено два паропровода диаметрами 50 мм и 150 мм. Оба паропровода имеют одинаковую температуру поверхности 450 °С. Температура окружающего воздуха 50 °С. Паропроводы проложены один от другого на расстоянии, исключающем взаимное тепловое влияние. Найти отношение удельных тепловых потерь.

Ответ: $q_1/q_2 = 0,382$.

11.10. На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром 20 мм и длиной 2 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении 1 бар. Температура на поверхности трубы 94,5 °С. Определить количество пара, которое конденсируется на поверхности трубы за 1 час.

Ответ: $G = 15,9 \text{ кг/ час.}$

11.11. На горизонтальной трубе диаметром 16 мм и длиной 1,2 м происходит пленочная конденсация водяного пара при давлении 30 бар. Температура поверхности трубы равна 227 °С. Как изменится средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе, если трубу расположить вертикально, а все другие условия оставить без изменений?

Ответ: $\alpha_{\text{верт}}/\alpha_{\text{гор}} = 0,55.$

11.12. Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя к кипящей воде, если тепловая нагрузка поверхности нагрева 200 кВт/м², режим кипения пузырьковый и вода находится под давлением 2 бар.

Ответ: $\alpha = 18,4 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К).}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить факторы, определяющие интенсивность конвективного теплообмена.
2. Уравнение И. Ньютона для конвективного теплообмена.
3. Основные положения теории подобия.
4. Что такое критериальное уравнение?
5. Физический смысл критериев подобия Нуссельта, Грасгофа, Прандтля.
6. Каков физический смысл коэффициента конвективного теплообмена?
7. Каков физический смысл определяющей температуры?
8. Что такое определяющий размер? Как выбирается определяющий размер для соосно-вертикальных цилиндров?
9. Какие физические свойства среды влияют на интенсивность конвективного теплообмена?
10. Можно ли распространять зависимости, полученные для конвективного теплообмена в газовой среде на капельные жидкости?
11. Влияет ли на интенсивность конвективного теплообмена цвет теплоотдающей поверхности?
12. Перечислить факторы, определяющие интенсивность конвективного теплообмена при вынужденном движении жидкости.
13. Признаки ламинарного, переходного, турбулентного движения жидкости.
14. Какие факторы влияют на режим движения жидкости?
15. Как влияет режим движения жидкости на интенсивность конвективного теплообмена?

ТЕМА 12. Излучение

Общие понятия и определения; тепловой баланс лучистого теплообмена. Законы теплового излучения. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой; коэффициент облученности; теплообмен излучением между телами, произвольно расположенными в пространстве. Защита от излучения. Излучение газов. Излучение факела пламени при пожаре. Расчет безопасных в пожарном отношении расстояний и экранной защиты от теплового излучения. Расчет теплообмена излучением в поглощающей и излучающей среде. Лучистый теплообмен между ограждением и находящейся внутри него высокотемпературной газовой средой.

Радиационно-конвективный и радиационно-кондуктивный теплообмен при большой оптической толщине среды. Критерии радиационного подобия. Теплообмен ограждающих конструкций при пожаре в помещении.

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 допустимой погрешностью.

Задачи для самостоятельного решения

12.1. Поверхность стального изделия имеет температуру $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и степень черноты $0,7$. Излучающую поверхность можно считать серой. Вычислить плотность собственного излучения поверхности изделия и длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной интенсивности излучения.

Ответ: $E = 39,7\text{ кВт/м}^2$; $\lambda_{\max} = 2,898\text{ мкм}$.

12.2. Температура поверхности выходного коллектора пароперегревателя высокого давления $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вычислить тепловые потери с 1 погонного метра неизолированного коллектора путем лучистого теплообмена, если наружный диаметр коллектора 275 мм , коэффициент поглощения $0,8$, а температура ограждений $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $q = 13,7\text{ кВт/м}$.

12.3. Обмуровка топочной камеры парового котла выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка — из листовой стали. Расстояние между обшивкой и кирпичной кладкой равно 30 мм , и можно считать его малым по сравнению с размерами стен топки. Вычислить потери тепла в окружающую среду с единицы поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности обмуровки $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура стальной обшивки $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Степени черноты шамота $0,8$ и листовой стали $0,6$.

Ответ: $q_{12} = 435\text{ Вт/м}^2$.

12.4. Как изменятся тепловые потери в окружающую среду, если между обмуровкой и обшивкой топочной камеры, рассмотренной в задаче 12.3, установить стальной экран, имеющий степень черноты $0,6$.

Ответ: $q_{12} = 196\text{ Вт/м}^2$.

12.5. Цилиндрический сосуд для хранения жидкого кислорода выполнен с двойными стенками, покрытыми слоем серебра, коэффициент поглощения которого равен $0,02$. На наружной поверхности внутренней стенки температура равна $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расстояние между стенками мало, и площадь внутренней поверхности теплоизлучающей стенки равна площади наружной поверхности теплопоглощающей стенки. Вычислить тепловой поток, проникающий в сосуд через стенки путем лучистого теплообмена, если теплоотдающая поверхность равна $0,157\text{ м}^2$.

Ответ: $Q = 0,66\text{ Вт}$.

12.6. Нагревательную печь с целью уменьшения тепловых потерь окружили стальным экраном. Размеры печи велики по сравнению с расстоянием между ее наружной поверхностью и экраном. В результате измерений было получено, что температура наружной поверхности кладки печи равна $107\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура стального экрана $57\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти плотность ре-

зультирующего лучистого потока от поверхности кладки к экрану, приняв степени черноты кладки и экрана равными соответственно 0,85 и 0,75.

Ответ: $q = 342 \text{ Вт/м}^2$.

12.7. Какова должна быть степень черноты защитного экрана коллектора пароперегревателя, чтобы тепловые потери с поверхности этого коллектора за счет излучения не превышали 580 Вт/м^2 и температура на поверхности экрана не превосходила $70 \text{ }^\circ\text{C}$? Диаметр защитного экрана равен 325 мм , коэффициент теплоотдачи за счет конвекции с внешней поверхности экрана равен $11,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ и температура окружающей среды и ограждений равна $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответ: $\varepsilon_{\text{эк}} = 0,34$.

12.8. Вычислить величину лучистого потока между двумя черными дисками, расположенными друг против друга в параллельных плоскостях. Температуры первого диска $500 \text{ }^\circ\text{C}$ и второго $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Диски одинаковых размеров, их диаметр 200 мм и расстояние между ними 400 мм .

Ответ: $Q = 30 \text{ Вт}$.

12.9. Вычислить тепловой поток при лучистом теплообмене между двумя параллельными полосами, расстояние между которыми 3 м . Ширина полос одинакова и равна 2 м , а длина велика по сравнению с шириной. Степень черноты полос равна $0,8$, а температуры их поверхности $500 \text{ }^\circ\text{C}$ и $200 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Ответ: $Q = 9,05 \text{ кВт/м}^2$.

12.10. В нагревательной печи температура газов по всему постоянна и равна $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Объем печи 12 м^3 , полная поверхность ограждения 28 м^2 . Общее давление продуктов сгорания $98,1 \text{ кПа}$, а парциальное давление водяных паров 8 кПа и углекислоты 12 кПа . Вычислить собственное излучение продуктов сгорания.

Ответ: $q = 57,4 \text{ кВт/м}^2$.

12.11. Вычислить степень черноты и собственное излучение газовой смеси, если средняя температура газа снизилась до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, а все другие условия остались те же, что и в задаче 12.10.

Ответ: $\varepsilon_{\text{г}} = 0,256$; $q = 32,8 \text{ кВт/м}^2$.

12.12. Вычислить плотность теплового потока, обусловленного лучеиспусканием от дымовых газов к поверхности цилиндрического газохода диаметром 500 мм . Газы содержат 10% углекислоты и 5% водяных паров (общее давление газов $98,1 \text{ кПа}$). Температуры газов на входе в газоход $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и на выходе из него $600 \text{ }^\circ\text{C}$; средняя температура поверхности газохода $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и степень черноты поверхности $0,85$.

Ответ: $q = 4,63 \text{ кВт/м}^2$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Эквивалентны ли понятия «степень черноты» и «относительная излучающая способность»?
2. Что такое степень черноты, ее единицы измерения?
3. Что такое относительная излучающая способность, ее единицы измерения?
4. Что такое спектр излучения?
5. Как влияет спектр излучения на интенсивность излучения?
6. Какой спектр излучения имеют газы, жидкости, твердые вещества?
7. Как влияет число атомов в молекуле газа на интенсивность его теплового излучения?
8. Как влияет величина температуры поверхности на спектральный состав теплового излучения?
9. Что называется интегральной излучательной способностью, ее единицы измерения?
10. Какие составляющие входят в уравнение теплового баланса для теплового излучения?
11. Как связаны между собой отражательная, пропускная и поглощательная способности тела?
12. Что такое абсолютно черное тело, абсолютно прозрачное тело, абсолютно зеркальное тело?
13. Как влияет состояние излучающей поверхности на величину степени черноты?
14. Сформулировать закон И. Стефана-Л. Больцмана применительно к излучению абсолютно черного тела, реального тела.
15. Объяснить физический смысл угла взаимного облучения тел.

ТЕМА 13. Теплопередача. Интенсификации теплопередачи

Сложный теплообмен. Теплопередача через плоскую, цилиндрическую, сферическую и ребренную стенки. Коэффициент теплопередачи. Пути интенсификации процесса теплопередачи. Тепловая изоляция. Выбор материала тепловой изоляции.

Методические указания

Разделение теплопереноса на теплопроводность, конвекцию и излучение удобно для изучения этих процессов. В действительности очень часто встречается сложный теплообмен, при котором теплота передается двумя или даже всеми тремя способами одновременно. Наиболее распространенным случаем сложного теплообмена является теплоотдача от поверхности к газу (или от газа к поверхности). При этом имеет место кон-

вективный теплообмен между поверхностью и омывающим ее газом и, кроме того, та же самая поверхность излучает и поглощает энергию, обмениваясь потоками излучения с газом и окружающими предметами. В целом интенсивность сложного теплообмена в этом случае характеризуют суммарным коэффициентом теплоотдачи.

Обратите внимание на различие между коэффициентами теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи. Эти коэффициенты характеризуют интенсивность различных процессов, по-разному рассчитываются и путать их недопустимо. Коэффициент теплопередачи есть чисто расчетная величина, которая определяется коэффициентами теплоотдачи с обеих сторон стенки и ее термическим сопротивлением. Важно подчеркнуть, что коэффициент теплопередачи никогда не может быть больше коэффициента теплоотдачи и термического сопротивления. Сильнее всего он зависит от наименьшего из этих значений, оставаясь всегда меньше его.

При работе слушатель должен обратить внимание на определение коэффициента теплопередачи, его единицы измерения, физический смысл, способы определения величины коэффициента теплообмена между продуктами горения и вертикальной стенкой. Важным моментом является влияние ориентации тепловоспринимающей поверхности на интенсивность сложного теплообмена. Надо так же выяснить, как определяется ошибка приближения при вычислении температуры на необогреваемой поверхности в сложном теплообмене, и что является условием выхода из цикла вычислений.

Задачи для самостоятельного решения

13.1. Определить плотность теплового потока через бетонную (бетон на гранитном щебне) стенку толщиной 20 см. Температура в помещении 20 °С, температура наружного воздуха –10 °С, а коэффициент конвективного теплообмена между охлаждающим воздухом и тепловыделяющей поверхности равен 15 Вт/(м²·К). Коэффициент теплообмена между воздухом в помещении и теплопоглощающей поверхностью 8,7 Вт/(м²·К).

Ответ: $q = 87,8 \text{ кВт/м}^2$.

13.2. При продолжительном пожаре в подвальном помещении установилась температура среды 300 °С. Температура в помещении со стороны первого этажа 20 °С. Определить температуру на поверхности перекрытия со стороны первого этажа, если оно выполнено из песчаного бетона толщиной 16 см.

Ответ: $t_{w2} = 93 \text{ °С}$.

13.3. Бетонное перекрытие в условиях задачи 13.2. со стороны первого этажа покрыто деревянным настилом толщиной 4 см. Определить температуры на внешне и внутренней поверхности деревянного настила.

Ответ: $t_{w2} = 185 \text{ °С}$; $t_{w3} = 60 \text{ °С}$.

13.4. В подсобном помещении здания проложен паропровод диаметром 50/53 мм. Температура пара равна 100 °С, а коэффициент теплообмена между наружной поверхностью трубопровода и охлаждающим воздухом 14,6 Вт/(м²·К). Коэффициент теплообмена между паром и внутренней поверхностью трубопровода равен 5000 Вт/(м²·К). Определить температуру на внешней поверхности трубопровода и потери тепла с 1 погонного метра.

Ответ: $t_{w2} = 130 \text{ °С}$; $q_1 = 1310 \text{ Вт/м}$.

13.5. Подобрать эффективную теплоизоляцию паропровода, внешний диаметр которого равен 53 мм. Коэффициент теплообмена между внешней поверхностью теплоизолированного паропровода и окружающей средой не должен превышать 13,3 Вт/(м²·К).

Ответ: $\lambda_{из} < 0,352 \text{ Вт/(м·К)}$.

13.6. Рассчитать толщину слоя тепловой изоляции паропровода диаметром 50/53 мм с тем, чтобы температура на внешней поверхности теплоизоляции не превышала 60 °С. Температура на внутренней поверхности теплоизоляции можно принять равной температуре пара 150 °С. Коэффициент теплообмена между паром и внутренней поверхностью паропровода 5000 Вт/(м²·К), а между внешней поверхностью паропровода и охлаждающим воздухом 13,3 Вт/(м²·К). Температуру окружающего воздуха принять 10 °С. Теплоизоляционный материал — стекловата.

Ответ: $\delta = 10,4 \text{ мм}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение тепловых потерь через единицу длины цилиндрической стенки, указать единицу измерения в СИ.
2. Дать определение процесса теплопередачи.
3. Каков физический смысл коэффициента теплопередачи?
4. Почему коэффициент теплопередачи и коэффициент теплообмена имеют одинаковые единицы измерения?
5. Как можно вычислить величину коэффициента теплопередачи для одно- и многослойных плоских стенок?
6. Как зависит величина коэффициента теплопередачи от толщины плоской стенки?
7. Как определить суммарное термическое сопротивление многослойной тонкой стенки?

8. Каково соотношение между коэффициентом теплопередачи и термическим сопротивлением?

9. Как можно вычислить величину коэффициента теплопередачи для одно- и многослойных цилиндрических стенок?

10. При каких условиях в расчете коэффициента теплопередачи через цилиндрическую поверхность можно использовать уравнения плоской стенки?

11. Как изменятся тепловые потери через цилиндрическую стенку при увеличении ее толщины?

12. Могут ли увеличиваться тепловые потери через цилиндрическую стенку при увеличении ее толщины?

13. При каких условиях увеличение толщины теплоизоляции всегда приводит к уменьшению тепловых потерь?

ТЕМА 14. Основы массообмена

Основные понятия и определения. Концентрационная диффузия. Термо- и бародиффузия. Конвективная диффузия. Дифференциальные уравнения тепломассообмена. Диффузионные критерии подобия. Критериальные уравнения. Расчет тепломассообмена в воздухе при его вынужденном и свободном движении. Тепломассообмен при испарении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Оценка пожарной опасности образующихся паровоздушных смесей в помещениях.

Методические указания

Обратите внимание, что по своей структуре закон Фика аналогичен закону Фурье, описывающему передачу тепла теплопроводностью, причем аналогом градиента температур является в данном случае градиентом концентраций, представляющем собой изменение концентрации диффундирующего вещества на единицу длины нормали между двумя поверхностями постоянных, но различных концентраций. Коэффициент пропорциональности в выражении закона Фика называется коэффициентом молекулярной диффузии, который является аналогом коэффициента теплопроводности. Значение коэффициента диффузии является функцией свойств распределяемого вещества, свойств среды, через которого оно диффундирует, температуры и давления. Обычно величина коэффициента молекулярной диффузии возрастает с увеличением температуры и понижением давления (для газов). В каждом конкретном случае значение этого коэффициента определяют по опытным данным или по теоретическим и полуэмпирическим уравнениям с учетом температуры и давления, при которых протекает процесс диффузии.

При анализе дифференциального уравнения конвективной диффузии необходимо учесть, что помимо концентрации, переменной является скорость потока жидкости. Поэтому данное уравнение надо рассматривать

совместно с дифференциальными уравнениями гидродинамики: уравнениями Навье-Стокса и уравнением неразрывности потока. Однако эта система уравнений не имеет аналитического решения, и для получения расчетных зависимостей по массообмену приходится прибегать к преобразованию дифференциального уравнения конвективной диффузии методами теории подобия. Трудности чисто теоретического анализа и расчета массопереноса обусловлены сложностью механизма переноса к границе раздела фаз и от нее путем молекулярной и турбулентной диффузии и недостаточной изученностью гидродинамических закономерностей турбулентных потоков, особенно вблизи подвижной границы раздела фаз.

Механизм массоотдачи характеризуется сочетанием молекулярного и конвективного переноса. Еще более сложным является процесс массопередачи, включающий в качестве составляющих процессы массоотдачи по обе стороны границы раздела фаз. В связи с этим предложен ряд упрощенных моделей, представляющих собой в той или иной степени упрощенные схемы механизма массопереноса. В основу большинства моделей положены следующие допущения:

- общее сопротивление переносу из фазы в фазу складывается из сопротивления двух фаз и сопротивления поверхности раздела фаз. Однако сопротивление на поверхности раздела можно в большинстве случаев считать равным нулю. Тогда, принимая, что процесс переноса в пределах каждой фазы протекает независимо от другой, общее сопротивление переносу можно рассматривать как сумму фазовых сопротивлений.

- На поверхности раздела фазы находятся в состоянии равновесия, причем равновесие на границе фазы устанавливается значительно быстрее изменения концентрации в ядре фазы.

Задачи для самостоятельного решения

14.1. Пожарный водоем имеет открытое зеркало испарения площадью 100 м^2 . Средняя температура воздуха самого жаркого месяца $35 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха 22% ; скорость ветра $2,5 \text{ м/с}$; температура воды $22 \text{ }^\circ\text{C}$; концентрация пара у поверхности воды $19,8 \text{ г/м}^3$; в воздухе вдали от поверхности воды 15 г/м^3 . Определить количество воды, испаряющейся с поверхности водоема.

Ответ: $G = 12,1 \text{ кг/час}$.

14.2. В производственном помещении с открытой поверхностью площадью 1 м^2 испаряется бензин. Температура воздуха в помещении и бензина равна $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Барометрическое давление 102 кПа . Определить количество испаряющегося бензина за 1 час в условиях естественной конвекции воздуха.

Ответ: $J = 4,8 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{час)}$.

14.3. Ванна для промывки деталей бензином имеет длину 1 м. Поверхность испарения омывается потоком воздуха со скоростью 5 м/с. Температура потока воздуха 20 °С, температура поверхности испарения 15 °С. Определить количество испаряющегося бензина с единицы поверхности за 1 час.

Ответ: $J = 10,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$.

14.4. В горящее помещение для тушения пожара подается распыленная вода. Средний диаметр капель равен 1 мм. Средняя скорость движения капель 15 м/с. Длина струи 15 м. Расход воды 3,4 л/с. Температура воздуха в помещении 300 °С. Барометрическое давление в помещении 1 бар. Определить количество воды, испарившееся за время полета струи.

Ответ: $G = 0,8 \text{ кг}/\text{с}$.

14.5. В сушильной камере происходит испарение этилового спирта из раствора фенолформальдегидной смолы. Эквивалентный диаметр сушильной камеры равен 0,3 м. Сушка осуществляется сухим воздухом, температура которого на входе 200 °С, а скорость движения 2 м/с. Определить количество паров спирта, испаряющихся с единицы поверхности за час.

Ответ: $J = 1,85 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое концентрационная диффузия, каким законом описывается этот процесс?
2. Укажите область применения термической диффузии в современных технологиях?
3. Какой физический процесс вызывается диффузионным термоэффектом?
4. Сопровождается ли барродиффузия переносом вещества?
5. Можно ли использовать теорию подобия при решении задач конвективного массопереноса?
6. Можно ли решить задачу испарения жидкости со свободной поверхности методами конвективного массопереноса?

ТЕМА 15. Основы энергосбережения и основные направления экологии энергоресурсов.

Вторичные энергетические ресурсы

Основные направления экологии энергоресурсов. Повышение эффективности энергетического и энергоиспользующего оборудования. Снижение энергопотерь, совершенствование учета и нормирование расхода энергоресурсов. Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР). Общие положения и классификация ВЭР. Роль ВЭР в топливо и теплотреблении. Источники ВЭР и их использования

Методические указания

В результате сгорания органического топлива образуется ряд вредных веществ. Это, прежде всего, оксиды серы SO_2 и SO_3 и золы. Зола некоторых топлив помимо механического воздействия на органы дыхания оказывает также токсическое влияние на организм. Так, в золе донецких антрацитов содержится мышьяк, зола ряда твердых топлив содержит фтористые соединения. При сжигании мазутов выделяются соединения ванадия. Весьма токсичными компонентами дымовых газов, которым в последнее время уделяется большое внимание, являются оксиды азота, образующиеся из азотистых соединений топлива, а также — при высокой температуре в зоне горения — в результате окисления азота воздуха. Очень важно, что некоторые из составляющих дымового газа, например оксиды серы и азота, усиливают вредное воздействие друг друга на организм. При сжигании природного газа выбросы оксидов азота являются, пожалуй, единственными, но существенными загрязнителями атмосферы.

Поддержание ПДК на допустимом уровне обеспечивается двумя методами — пассивным и активным. Пассивный метод заключается в строительстве высоких дымовых труб с целью рассеять вредные вещества по возможности над большей территорией, уменьшив тем самым среднюю концентрацию выбрасываемых веществ. Этот метод является в настоящее время наиболее распространенным для поддержания концентрации сернистых газов и оксидов азота в атмосфере на уровне, обеспечивающем ПДК. Высота дымовых труб современных крупных тепловых электрических станций уже превысила 300 м; это сложные, дорогие инженерные сооружения. К активным методам снижения количества вредных выбросов относится, прежде всего, предварительная подготовка топлива с целью, например, уменьшения содержания в нем серы посредством механического обогащения или газификации. Кроме того, снижению выбросов вредных веществ способствует рациональное ведение топочного процесса (режима работы котлоагрегата). Так, например, снижение температуры в ядре факела приводит к уменьшению окисления азота воздуха и снижению выбросов оксидов азота с дымовыми газами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой из узлов теплоэнергетических установок имеет наибольшие тепловые потери?
2. Дайте определение процесса регенерации тепловой энергии.
3. Можно ли регенерировать энергию избыточного давления?
4. Для чего используют осушку компрессорного воздуха?
5. Какие энергетические ресурсы называются вторичными?
6. Что из себя представляют конструктивно котлы-утилизаторы?

7. Можно утилизировать теплоту твердых веществ? Приведите примеры.

8. Объясните назначение дымовой трубы.

9. Котельная спроектирована на четыре однотипных котлоагрегата с общей кирпичной дымовой трубой. С окончанием монтажа первого котла он был введен в эксплуатацию. Зимой верхняя часть трубы стала разрушаться. Почему?

10. С какой целью в топке котла поддерживается разрежение?

11. К чему может привести погасание факела в топке котла?

12. Почему недопустимо осаждение накипи на внутренней поверхности экранных труб котла?

13. Для чего служит непрерывная продувка котла и можно ли использовать ее теплоту?

14. Как повлияет на работу электрофильтра увеличение скорости дымовых газов?

ТЕМА 16. Тепломассообменные устройства

Назначение, классификация и схемы теплообменных аппаратов. Принцип расчета теплообменных аппаратов. Конструктивный и поверочный тепловые расчеты теплообменных аппаратов. Средний температурный напор. Основы гидродинамического расчета теплообменных аппаратов. Расчет температур теплоносителей на выходе из аппарата при оценке безопасных условий работы.

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:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\kappa} + \alpha_u.$$

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

$$\alpha_u = 0,23 \cdot \varepsilon \left(\frac{T_z + T_{cm}}{2} \right)^3,$$

где ε — 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 средне логарифмического 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 средне логарифмического напора независимо от схемы включения (прямоток или противоток) справедлива формула:

$$\Delta t_{cp.l} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}},$$

где Δt_{δ} и Δt_{m} — наибольший и наименьший температурный напор соответственно.

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

Задачи для самостоятельного решения

16.1. Минеральное масло поступает в маслоохладитель с температурой 70°C и охлаждается до температуры 30°C . Температура охлаждающей воды на входе 20°C . Определить температуру воды на выходе из мас-

лоохладителя, если расход масла составляет 10000 кг/час, а воды 20400 кг/час. Потерями тепла в окружающую среду можно пренебречь.

Ответ: $t_{B2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

16.2. В воздухоподогревателе воздух нагревается от температуры 20 °С до температуры 210 °С, а горячие газы охлаждаются от температуры 410 °С до температуры 250 °С. Определить среднелогарифмический температурный напор для случаев движения их по прямоточной и противоточной схемам.

Ответ: $\Delta t_{\text{прям}} = 154 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{прот}} = 215 \text{ }^\circ\text{C}$.

16.3. В трубчатом пароводяном теплообменнике сухой насыщенный водяной пар с давлением 3,5 бар конденсируется на внешней поверхности труб. Вода, движущаяся по трубам, нагревается от температуры 20 °С до температуры 90 °С. Определить расход пара в пароводяном теплообменнике, если расход воды составляет 8000 кг/час. Считать, что переохлаждение конденсата отсутствует.

Ответ: $G_{\text{пар}} = 1090 \text{ кг/час}$.

16.4. Определить поверхность нагрева водяного экономайзера, в котором теплоносители движутся по противоточной схеме, если известны следующие величины: температура газов на входе 420 °С, расход газов 220 т/час; температура воды на входе 105 °С; расход воды 120 т/час; количество передаваемого тепла 13,5 МВт.

Ответ: $F = 1100 \text{ м}^2$.

16.5. Определить поверхность нагрева и число секций водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе». Греющая вода движется по внутренней стальной трубе диаметром 35/32 мм и имеет температуру на входе 95 °С. Расход греющей воды 2,13 т/час. Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от температуры 15 °С до 45 °С. Внутренний диаметр внешней трубы 48 мм. Расход нагреваемой воды 3,2 т/час. Длина одной секции теплообменника 1750 мм. Потерями тепла через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

Ответ: $F = 1,22 \text{ м}^2$; $n = 7$.

16.6. В секционном теплообменнике типа «труба в трубе» горячее трансформаторное масло охлаждается водой. Масло движется по внутренней латунной трубе диаметром 14/12 мм со скоростью 4 м/с. Температура масла на входе в теплообменник равна 100 °С. Вода движется по кольцевому зазору противотоком по отношению к маслу со скоростью 2,5 м/с; ее температура на входе 20 °С. Внутренний диаметр внешней трубы 22 мм. Определить общую длину теплообменной поверхности, при которой температура масла на выходе будет 60 °С. Потерями тепла через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

Ответ: $L = 11,4 \text{ м}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой аппарат называется теплообменным?
2. На какие группы делятся теплообменные аппараты?
3. По каким схемам осуществляется движение теплоносителей в теплообменных аппаратах?
4. Какие теплообменные аппараты называются рекуперативными?
5. Уравнение теплового баланса теплообменного аппарата.
6. Основное уравнение теплопередачи теплообменного аппарата.
7. Что такое условный водяной эквивалент, его физический смысл?
8. Графики изменения температур теплоносителей в теплообменных аппаратах с прямотоком и противотоком.
9. Как определяется среднеарифметический температурный напор в теплообменных аппаратах?
10. Как производится усреднение коэффициента теплопередачи?
11. Как определяется среднелогарифмический температурный напор?
12. Как влияет направление движения теплоносителей на величину среднелогарифмического температурного напора?
13. Как влияет направление движения теплоносителей на величины изменения температур греющего и охлаждающего теплоносителей?
14. Какие теплофизические свойства теплоносителей влияют на интенсивность теплопередачи в теплообменных аппаратах?
15. Какие параметры теплообмена можно использовать при определении эффективности использования того или иного теплоносителя?

ТЕМА 17. Применение теплоты в пожарной охране и охрана окружающей среды

Основные потребители теплоты. Элементы сушильной установки. Типы сушильных установок. Тепловой баланс сушильной установки и определение ее размеров. Техничко-экономические показатели сушилок.

Проблема защиты окружающей среды от выброса продуктов горения. Характеристики основных загрязняющих веществ. Основные методы очистки продуктов горения от вредных выбросов.

Основные направления экологии энергоресурсов. Повышение эффективности энергетического и энергоиспользующего оборудования. Снижение энергопотерь, совершенствование учета и нормирование расхода энергоресурсов.

Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР). Общие положения и классификация ВЭР. Роль ВЭР в топливо- и теплопотреблении. Источники ВЭР и их использования.

Методические указания

Для нужд теплоснабжения кроме топлива используют отходы теплоносителей от производственных процессов. Отходы теплоносителей в виде уходящих газов, пара и горячей воды называют вторичными энергоресурсами (ВЭР). ВЭР могут быть весьма значительными. Так, например, уходящие газы промышленных печей содержат до 40% подведенного к печи количества топлива. Вторичные энергоресурсы в виде уходящих газов и горячей воды подразделяют на группы по температурному признаку. Поэтому нужно знать, что уходящие газы характеризуются высокими температурами и энтальпией, а горячая вода — низкими температурами и энтальпией. Теплоту уходящих газов целесообразно использовать в специально установленных котлах-утилизаторах, вырабатывающих производственный пар, и подогревателях горячей воды для теплоснабжения. Неиспользуемые предприятием вторичные энергоресурсы ведут к потерям теплоты, выбросу ее в атмосферу, что снижает экономические показатели предприятия, создает непроизводительный расход топлива и загрязняет окружающую среду. Научитесь определять экономию топлива или теплоты за счет использования вторичных энергетических ресурсов в виде уходящих котельных и печных газов. Экономию условного топлива ($кг/с$) за счет использования вторичных энергоресурсов в виде уходящих печных газов находят по формуле:

$$B_{эж} = \frac{Q_m}{29300 \cdot \eta_{к.у}},$$

где Q_m — количество выработанной теплоты в виде пара в котле-утилизаторе за счет теплоты уходящих печных газов, $кДж/с$; $\eta_{к.у}$ — К.П.Д. замещаемой котельной.

Количество выработанной теплоты ($кДж/с$) в виде пара в котле-утилизаторе за счет теплоты уходящих печных газов:

$$Q_m = B_p (I_2 \cdot I_2') \beta (1 - \xi),$$

где B_p — расчетный расход топлива, $кг/с$; I_r — энтальпия газа на выходе из печи, $кДж/кг$ ($кДж/м^3$); I_2' — энтальпия газов на выходе из котла-утилизатора, $кДж/кг$ ($кДж/м^3$); β — коэффициент, учитывающий несоответствие режима и числа часов работы котла-утилизатора и печей;

ξ — коэффициент потерь теплоты котла-утилизатора в окружающую среду.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вредные вещества образуются при сгорании органического топлива?
2. Какими методами обеспечивается поддержание уровня ПДК при горении топлива, в чем заключаются эти методы?
3. Поясните принцип работы золоуловителя типа циклон ЗН.
4. Поясните принцип работы батарейного золоуловителя.
5. Поясните принцип работы центробежного скруббера.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

ЗАДАНИЕ 1

Расчет времени образования взрывоопасной концентрации

В производственном помещении размерами $A \cdot B \cdot H$, м, проходит газопровод диаметром D , мм, температурой газа t_1 , °C, и избыточном давлении P_1 , см вод. ст. В результате аварии на поверхности трубопровода образовался свищ (трещина) площадью F , мм².

Оценить время образования взрывоопасной концентрации в помещении, а также величины скоростей газового потока в трубопроводе и на срезе свища. Условия в помещении до аварии считать комфортными. Результаты расчета представить в виде таблицы 1.4.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета

Первая цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A [м]	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
B [м]	9	8	10	8	11	13	6	14	14	15
H [м]	3,9	3,95	3,85	5,9	4,95	3,75	3,7	3,8	4,85	4,9

Таблица 1.2

Исходные данные для расчета

Вторая цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_1 , см вод. ст.	11,3	12,4	13,5	14,6	15,7	16,8	17,9	18,1	19,2	20,3
t_1 , °C	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблица 1.3

Исходные данные для расчета

Третья цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D [мм]	51	66	25	37	12	19	51	12	19	25
F [мм ²]	1,6	2,7	3,8	4,9	5,2	6,3	7,4	1,2	2,3	3,4
Газ	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	CH ₄	H ₂	C ₂ H ₆	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄

Таблица 1.4

Результаты термодинамического расчета процесса истечения

Термодинамические параметры	Обозначения	Единицы измерения	Значение параметра
Абсолютное давление в газопроводе	P_r	Па	
Удельный объем в газопроводе	v_1	м ³ /кг	
Площадь сечения газопровода	S	м ²	
Скорость движения газа по газопроводу	W_r	м/с	
Критическое отношение давлений	$\beta_{кр}$	–	
Скорость истечения газа через свищ	W	м/с	
Массовый расход	G	кг/с	
Нижний концентрационный предел распространения пламени	НКПР	%	
Объем газа при НКПВ	V_r	м ³	
Масса газа при НКПВ	M_r	кг	
Время образования взрывоопасной концентрации в помещении	τ	с	

Рекомендации по выполнению контрольного задания 1

1. Выписать численные значения исходных термодинамических параметров своего варианта и перевести эти значения, если требуется, в единицы Системы Интернациональной.

2. Определить величину абсолютного давления газа в газопроводе:

$$P_2 = P_1 + P_0.$$

3. Определить величину отношения давлений:

$$\beta = \frac{P_0}{P_2}.$$

4. Определить величину критического отношения давлений.

5. Сравнивая величину отношения давлений с ее критическим значением определить режим истечения газа из газопровода.

6. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, определить величину удельного объема газа в газопроводе.

7. Определить величину скорости истечения газа через свищ. Если режим истечения критический, используется уравнение:

$$w_{kp} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot PV \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}} = \sqrt{kPV}.$$

8. Определить величину массового расхода газа через свищ. Если режим истечения докритический, используется уравнение:

$$G = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2.29)$$

если режим истечения критический — уравнение:

$$\Phi_{kp} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{2}{(k+1)^{\frac{k}{k-1}}}}. \quad (2.35)$$

9. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, определить объемный расход газа V_T вытекающего из газопровода через свищ.

10. Определить площадь поперечного сечения трубопровода:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

11. Определить скорость движения газа по газопроводу:

$$w = \frac{v_g}{S}.$$

12. Определить объем помещения:

$$v_n = ABH.$$

13. Определить объем газа, образующего концентрацию, равную НКПР:

$$v_0 = v_n \cdot НКПР.$$

14. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона определить массу газа M_g , образующую концентрацию, равную НКПР.

15. Оценить время образования в помещении концентрации газа, равную НКПР:

$$\tau = \frac{M_g}{G}.$$

Содержание отчета по выполнению контрольного задания 1

1. Формулировка задания с численными значениями переменных, соответствующих своему варианту.

2. Пооперационное выполнение контрольного задания, включающее:

- объяснение выполняемой операции;
- вывод расчетного уравнения;
- проведение необходимых вычислительных операций;
- операции с единицами измерения;
- ответ в виде числа и единицы измерения.

3. Результаты расчета оформляются в виде итоговой таблицы 1.4.

Для самопроверки правильности выполнения задания 1 рекомендуется воспользоваться программным комплексом QTESTER6, опция «Взрывоопасная концентрация».

ЗАДАНИЕ 2

Термодинамический расчет цикла ДВС

Цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания пожарного автомобиля имеет следующие характеристики: степень сжатия ε ; степень повышения давления λ ; степень предварительного расширения ρ ; начальное давление P_1 , (кПа; начальная температура t_1 , °C.

Принимая в качестве рабочего тела 1 кг продуктов горения с удельной изобарной теплоемкостью c_p ; и удельной изохорной теплоемкостью c_v , необходимо определить:

- параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла (давление, температуру, удельный объем);
- тепло и работу, для каждого из процессов, входящих в цикл;
- термический КПД цикла, сравнив его с КПД цикла Карно, имеющего одинаковые по сравнению с расчетным циклом максимальное и минимальное значения температур.

Вычертить графики цикла в полулогарифмическом масштабе в P-v и T-s координатах на миллиметровой бумаге, размер – половина формата А4. Результаты расчета представить в виде таблицы 2.4.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета

Первая цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
c_p , кДж/кг·°C	950	1000	1050	1100	1150	1150	1100	1050	1000	950
c_v , кДж/кг·°C	780	800	820	840	860	880	800	820	740	860
μ , кмоль/кг	33	34	35	36	37	33	34	35	36	37

Таблица 2.2

Исходные данные для расчета

Вторая цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_1 , кПа	99	97	98	99	100	101	102	103	101	96
t_1 , °C	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20

Таблица 2.3

Исходные данные для расчета

Третья цифра номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε	7,5	8	8,5	19	20	21	24	15	14	15
ρ	1	1	1	2	2,1	2,2	2,5	1,6	1,7	1,8
λ	4	4,5	4,2	1	1	1	1	2	2,1	2,2

Таблица 2.4

Результаты термодинамического расчета цикла ДВС

Номера	P_1 , кПа	v , м ³ /кг	t , °C	Процесс	q , кДж/кг	l , кДж/кг
1				1–2		
2				2–3		
3				3–4		
4				4–5		
5				5–1		

Рекомендации по выполнению
контрольного задания 2

1. Выписать численные значения исходных термодинамических параметров своего варианта и перевести эти значения, если требуется, в единицы Системы Интернациональной.

2. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, определить величину удельного объема рабочего тела до сжатия.

3. Определить величину удельного объема после сжатия рабочего тела:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}.$$

4. Используя уравнения (1 и 2), а также численные значения степени повышения давления и степени предварительного расширения, определить, какой цикл предстоит рассчитывать: с изохорным, изобарным или со смешанным подводом тепла.

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2}. \quad (1)$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}. \quad (2)$$

5. В соответствии с видом цикла, используя уравнения (1), (2), законы идеальных газов (Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля), а также уравнение политропного процесса, последовательно рассчитать значения давления, абсолютной температуры и удельного объема в характерных точках цикла:

$$Pv^n = const.$$

6. Найти значения теплоты в процессах, составляющих рассчитываемый цикл.

7. Используя уравнения (3) и (4), определить значения работы в процессах, составляющих рассчитываемый цикл.

Работа изобарного процесса:

$$l_{2,3} = P_2(v_3 - v_2). \quad (3)$$

Работа адиабатного процесса:

$$l_{1,2} = \frac{P_1 v_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (4)$$

8. Используя значения вычисленных ранее температур в характерных точках цикла, определить величину К.П.Д. цикла Карно:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

9. В соответствии с классифицированным циклом, используя соответствующее уравнение, определить значение К.П.Д. данного цикла:

$$\text{К.П.Д. цикла Отто} \text{ — } \eta_u = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

$$\text{К.П.Д. цикла Дизеля} \text{ — } \eta_u = 1 - \frac{\rho^k}{k\varepsilon^{k-1}(\rho-1)},$$

$$\text{К.П.Д. цикла Тринклера} \text{ — } \eta_u = 1 - \frac{\lambda\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1}[\lambda - 1 + k\lambda(\rho-1)]}.$$

Содержание отчета по выполнению контрольного задания 2

1. Формулировка задания с численными значениями переменных, соответствующих своему варианту.
2. Пооперационное выполнение контрольного задания, включающее:
 - объяснение выполняемой операции;
 - вывод расчетного уравнения;
 - проведение необходимых вычислительных операций;
 - операции с единицами измерения;
 - ответ в виде числа и единицы измерения.
3. Результаты расчета оформляются в виде итоговой таблицы 2.4.
4. Диаграммы работы двигателя внутреннего сгорания в координатах P-v и T-s формата А4, выполненные на миллиметровой бумаге. Рекомендуется логарифмический масштаб градуировки оси P.

Для самопроверки правильности выполнения задания рекомендуется воспользоваться программным комплексом QTESTER6, опция «Двигатель внутреннего сгорания».

ЗАДАНИЕ 3

Определение времени безопасной работы личного состава в зоне интенсивного теплового излучения

В результате аварии произошел пролив жидкого топлива на площадь $F, м^2$, с последующим возгоранием при температуре наружного воздуха $t_f, °C$, и атмосферном давлении $P, мм рт. ст.$

Определить возможное время работы личного состава в зоне интенсивного теплового излучения в радиусе $R, м$ от центра пролива.

Таблица 3.1

Исходные данные для расчета

Первая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R, м$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

Таблица 3.2

Исходные данные для расчета

Вторая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_f, °C$	-10	-15	-20	-5	0	5	10	20	15	25
$P, мм рт. ст.$	760	765	770	725	730	735	740	745	750	755

Таблица 3.3

Исходные данные для расчета

Третья цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F, м^2$	50	100	200	400	180	195	165	190	330	160
Топливо	ПБ	БН	ДТ	НФ	МТ	БН	ДТ	НФ	ПБ	МТ

Примечание. ПБ — пропан-бутан; БН — бензин; ДТ — дизельное топливо; НФ — сырая нефть; МТ — метан.

Таблица 3.4

Результаты расчета времени работы

<i>Вычисленные параметры</i>	Обозначения	Единицы измерения	Численные значения
Эффективный диаметр пролива	d	м	
Плотность окружающего воздуха	$\rho_{\text{в}}$	кг/м ³	
Высота пламени	H	м	
Средняя плотность теплового потока	Q_0	кВт/м ²	
Вертикальный фактор облученности	$\Psi_{\text{в}}$		
Горизонтальный фактор облученности	$\Psi_{\text{г}}$		
Угловой коэффициент облученности	Ψ		
Коэффициент пропускания атмосферы	φ		
Расчетное время работы	τ	с	

Рекомендации по выполнению контрольного задания 3

1. Выписать численные значения исходных теплофизических параметров своего варианта и перевести эти значения, если требуется, в единицы Системы Интернациональной.

2. Рассчитать эффективный диаметр пролива горючей жидкости:

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}.$$

3. Определить плотность окружающего воздуха, используя уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{\mu P}{RT_f}.$$

4. Определить высоту пламени по эмпирической формуле:

$$H = 42d \left(\frac{m}{\rho_{\text{в}} \sqrt{gd}} \right)^{0,61}.$$

где: m — удельная массовая скорость горения топлива [кг.м²/с];
 $g = 9,81$ [м/с²] — ускорение свободного падения.

5. Определить промежуточные величины:

$$h = \frac{2H}{d}; S = \frac{2R}{d}; A = \frac{H^2 + S^2 + 1}{2S}; B = \frac{1 + S^2}{2S};$$

$$X = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} \right) \quad Y = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} \right).$$

6. Определить величину вертикального фактора облученности:

$$\Psi_{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S} \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2-1}} \right) + \frac{h}{S} \left(\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right) - \frac{AX}{\sqrt{A^2-1}} \right) \right].$$

7. Определить величину горизонтального фактора облученности:

$$\Psi_{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \left[Y \frac{B - \frac{1}{S}}{\sqrt{B^2-1}} - X \frac{A - \frac{1}{S}}{\sqrt{A^2-1}} \right].$$

8. Определить угловой коэффициент облученности:

$$\Psi = \sqrt{\Psi_{\epsilon}^2 + \Psi_{\epsilon}^2}.$$

9. Определяем среднюю плотность теплового потока, используя данные табл. 3.5, при необходимости допускается линейная интерполяция.

Таблица 3.5

**Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени
в зависимости от диаметра очага и удельная массовая скорость
выгорания для некоторых жидких углеводородных топлив**

<i>Топливо</i>	<i>Q₀ (кВт/м²)</i>					<i>M</i> <i>кгм²/с</i>
	<i>d = 10 м</i>	<i>d = 20 м</i>	<i>d = 30 м</i>	<i>d = 40 м</i>	<i>d = 50 м</i>	
Метан	220	180	150	130	120	0,08
Пропан-бутан	80	63	50	43	40	0,10
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04
Сырая нефть	25	19	15	12	10	0,04

10. Определить коэффициент пропускания атмосферы:

$$\varphi = \exp \left[-7,010^{-4} (R - 0,5d) \right]$$

11. Определить величину плотности теплового потока, падающего на личный состав, находящийся на расстоянии *R* от центра разлива:

$$q = \varphi \Psi Q_0.$$

12. Определить время работы личного состава в зоне интенсивного теплового излучения:

$$\tau = \frac{337}{q}.$$

Содержание отчета по выполнению контрольного задания 3

1. Формулировка задания с численными значениями переменных, соответствующих своему варианту.

2. Пооперационное выполнение контрольного задания, включающее:

- объяснение выполняемой операции;
- вывод расчетного уравнения;
- проведение необходимых вычислительных операций;
- операции с единицами измерения;
- ответ в виде числа и единицы измерения.

3. Результаты расчета оформляются в виде итоговой таблицы 3.4.

Для самопроверки правильности выполнения задания 3 рекомендуется воспользоваться программным комплексом QTESTER6, опция «Безопасное время работы л/с».

ЗАДАНИЕ 4

Определение толщины защитной гильзы

По стальному паропроводу с внутренним диаметром D_1 , мм, и толщиной стенки δ_1 , мм, движется перегретый водяной пар с температурой t_{f1} , °С. Температура окружающего воздуха равна t_{f2} , °С.

Определить необходимую толщину защитной гильзы, считая значение температуры на наружной поверхности t_{w3} , °С, предельным, при возможном контакте гильзы с горючим материалом, а также ошибку приближения при числе циклов приближений не менее трех.

Таблица 4.1

Исходные данные для расчета

Первая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Материал защитной гильзы	Асбоцементные скорлупы				Жароупорный перлитобетон $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$			Газобетон на молотом песке $\rho = 480 \text{ кг/м}^3$		

Таблица 4.2

Исходные данные для расчета

Вторая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_{w3} [°С]	75	80	85	90	70	65	77	82	87	72
t_{f2} [°С]	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

Таблица 4.3

Исходные данные для расчета

Третья цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_1 , мм	51	66	76	89	51	66	76	89	51	66
δ_1 , мм	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	3,0	4,0	3,0	2,0	2,0
t_{f1} , °С	170	180	190	200	210	220	175	185	195	205

Таблица 4.4

Результаты расчета толщины защитной гильзы

Вычисленные параметры	Обозначения	Единицы измерения	Приближения		
			1	2	3
Критерий Грасгофа для воздуха	Gr_m				
Критерий Релея для воздуха	Ra_m				
Критерий Нуссельта для воздуха	Nu_m				
Коэффициент теплообмена гильза-воздух	α_k	$Вт/м^2 \cdot ^\circ C$			
Тепловые потери паропровода	q_l	$Вт/м$			
Наружный диаметр гильзы	D_3	$мм$			
Толщина стенки гильзы	δ_2	$мм$			
Ошибка приближения	Δ	$\%$			

Рекомендации по выполнению контрольного задания 4

10. Выписать численные значения исходных параметров своего варианта и перевести эти значения, если требуется, в единицы Системы Интернациональной.

11. Определить температуру пограничного слоя воздуха у наружной поверхности защитной гильзы:

$$t_{m_1} = \frac{t_{w_3} + t_{f_2}}{2}.$$

12. Определить теплофизические параметры воздуха, находящегося в пограничном слое: коэффициент теплопроводности воздуха λ_m ($Вт/м \cdot ^\circ C$); кинематическая вязкость воздуха ν_m ($м^2 / с$); число Прандтля для воздуха Pr .

13. Определить коэффициент объемного расширения воздуха, находящегося в пограничном слое:

$$\beta_m = \frac{1}{t_{m_1} + 273}.$$

14. Определить внутренний диаметр защитной гильзы:

$$D_2 = D_1 + 2\delta_1.$$

15. Задать значение наружного диаметра защитной гильзы.

Для первого приближения: $D_3 = 2D_2$.

16. Определить толщину боковой стенки защитной гильзы в первом приближении:

$$\delta_2' = 0,5(D_3 - D_2).$$

17. Определить величину числа Грасгофа для свободной конвекции воздуха около наружной поверхности защитной гильзы:

$$Gr_m = \beta_m \frac{gD_3^3}{\nu_m^2} (t_{w_3} - t_{f_2}).$$

18. Определить величину числа Релея для воздуха в пограничном слое:

$$Ra_m = Gr_m Pr_m.$$

19. По величине числа Релея определить постоянные C и n для критериального уравнения:

Ra_m	C	n
$<0,0001$	0,5	0
$0,0001 \div 500$	1,18	0,125
$500 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$>2 \cdot 10^7$	0,135	0,333

20. Определить величину числа Нуссельта для свободной конвекции в большом объеме:

$$Nu_m = CRa_m^n.$$

21. Определить величину коэффициента конвективного теплообмена между наружной поверхностью защитной гильзы и воздухом:

$$\alpha_k = \frac{Nu_m \lambda_g}{D_3}.$$

22. Определить величину тепловых потерь с 1 погонного метра паропровода, защищенного гильзой в первом приближении:

$$q_1 = \pi D_3 \alpha_k (t_{w_3} - t_{f_2}).$$

23. Определить среднюю температуру прогрева материала защитной гильзы, считая температуру на ее обогреваемой поверхности близкой к температуре пара, а распределение температур по толщине гильзы — линейным:

$$t_{m_2} = 0,5(t_{f_1} + t_{w_3}).$$

24. Определить теплофизические параметры материала гильзы: коэффициент теплопроводности материала гильзы при температуре $0 \text{ } ^\circ\text{C}$

λ_{06} ($Bm/m \cdot ^\circ C$); температурный коэффициент теплопроводности материала гильзы β_6 ($Bm/m \cdot ^\circ C^2$).

25. Определить коэффициент теплопроводности материала защитной гильзы:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma 0} + \beta_{\sigma} t_{m_2} .$$

26. Определить наружный диаметр защитной гильзы во втором приближении, считая температуру на обогреваемой поверхности гильзы близкой к температуре пара:

$$D_3'' = D_2 \text{Exp} \left(\frac{2\pi\lambda_{\sigma}(t_{f_1} - t_{w_3})}{q_1} \right) .$$

27. Определить толщину боковой стенки защитной гильзы во втором приближении:

$$\delta_2'' = 0,5(D_3'' - D_2) .$$

28. Определить ошибку второго приближения:

$$\Delta = \frac{|D_3 - D_3''|}{D_3''} .$$

29. Повторяя операции по п.п. 6÷19 определить наружный диаметр защитной гильзы в третьем и четвертом приближении, результаты вычислений оформить в виде табл. 4.4.

Содержание отчета по выполнению контрольного задания 4

4. Формулировка задания с численными значениями переменных, соответствующих своему варианту.

5. Пооперационное выполнение контрольного задания, включающее:

- объяснение выполняемой операции;
- вывод расчетного уравнения;
- проведение необходимых вычислительных операций;
- операции с единицами измерения;
- ответ в виде числа и единицы измерения.

3. Результаты расчета оформляются в виде итоговой табл. 4.4.

Для самопроверки правильности выполнения задания 4 рекомендуется воспользоваться программным комплексом QTESTER6, опция "Толщина защитной гильзы".

4. Использование математической системы Mathcad для решения задач термодинамики и теплопередачи

В последние годы для выполнения научно-технических расчетов все чаще используют не традиционные языки программирования и электронные таблицы, а специально разработанные математические системы (в литературе их также называют математическими программами или пакетами). Среди них одной из самых популярных является система Mathcad.

Причина популярности заключается в простоте и удобстве использования. Любой человек, имеющий минимальные навыки работы с Windows и какими-либо программами (MS Word, MS Excel), практически сразу же начинает получать пользу от работы с системой Mathcad, обучение идет параллельно с решением конкретной задачи.

Для решения большинства учебных задач, которые вам встретятся при изучении курса «Основы термодинамики и теплопередачи» (а также математики и других дисциплин), достаточно освоить лишь простейшие приемы работы.

Затраты времени на освоение основ работы с Mathcad соизмеримы с затратами времени на изучение обычного калькулятора и, на наш взгляд, значительно меньше, чем на освоение приемов работы с программируемым калькулятором.

В настоящее время на русском языке имеется достаточно много книг о системе Mathcad, причем их количество с каждым годом растет. Сама система снабжена прекрасным электронным учебником с многочисленными примерами. Однако этот учебник написан на английском языке, поэтому рекомендуется ознакомиться с одной из книг.

Рекомендуется использовать Mathcad 7 и более поздние версии (Mathcad 8, Mathcad 2000 и т. д.).

Существуют стандартные и профессиональные версии системы (например, Mathcad 7.0 и Mathcad 7.0 Pro). Основное их отличие состоит в том, что в профессиональных версиях имеются некоторые дополнительные возможности, в частности, возможности программирования.

Для установки системы Mathcad 7.0 Pro нужен персональный компьютер класса 486 и выше (Pentium/Pentium MMX/Pentium Pro/Pentium II). Оперативная память должна быть не менее 12 Мбайт.

В крайнем случае, если возможности компьютера не позволяют, можно использовать и более ранние версии системы (есть версии, работающие под управлением операционной системы MS DOS), хотя работать с ними не столь удобно, как с последними версиями.

Начиная с Mathcad 7.0, пользовательский интерфейс максимально приближен к интерфейсу текстового процессора MS Word, что существенно облегчает освоение Mathcad.

После запуска программы Mathcad появляется окно, в котором имеется меню и чистый лист рабочего документа. Меню выглядит примерно так же, как меню таких программ, как Word и Excel.

Система Mathcad включает в себя три редактора: текстовый, формульный и графический. Поскольку расчетно-графическая работа, которую вам предстоит выполнить, включает в себя текст, вычисления по формулам и графики, работу можно полностью выполнить, используя только Mathcad. Значительная часть данного учебного пособия была подготовлена с использованием этой системы.

Текстовый редактор позволяет задавать текстовые комментарии, которые делают документ с формулами и графиками более понятным. Для того, чтобы начать ввод текста, можно с помощью меню сделать следующее: **Insert**, а затем **Text Region** (другой вариант — нажать клавишу, которая вводит кавычку "). Появится прямоугольник, в который можно вводить текст, который редактируется так же, как с помощью текстового процессора Word.

Для запуска формульного редактора достаточно установить курсор мыши в любое свободное место документа и щелкнуть левой клавишей мыши. Появится визир в виде маленького красного крестика. Визир указывает место, с которого будет начат набор формулы. В зависимости от места расположения визир может менять свою форму. В области формул визир превращается в синий уголок.

Допустим, нам необходимо выполнить какие-нибудь арифметические операции, например, найти сумму 2+3. Для этого достаточно ввести знаки 2, + и 3, а также поставить знак равенства. На рабочем листе мгновенно появится ответ 5:

$$2 + 3 = 5$$

Если необходимо вычислить значение синуса 1/5 радиана, можно набрать s, i, n, (, 1, /, 5,), =. На рабочем листе увидим ответ:

$$\sin\left(\frac{1}{5}\right) = 0.199$$

Однако не всегда функции удобно вводить с помощью клавиатуры. Можно сделать с помощью меню и мыши следующее: **Insert** затем **Function** затем выбрать нужную функцию.

Допустим, нужно вычислить постоянную адиабаты k . Если ввести

$$k := \frac{c_p}{c_v}$$

$$k = \blacksquare ,$$

то увидим сообщение об ошибке (функция или переменная не определена ранее). Чтобы получить значение постоянной адиабаты, следует ввести значения теплоемкостей:

$$c_p := 1050$$

$$c_v := 720$$

$$k := \frac{c_p}{c_v}$$

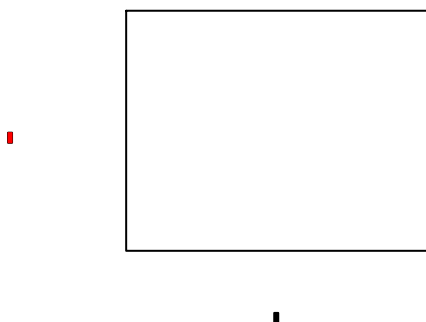
$$k = 1.458$$

Теперь постоянную адиабаты можно использовать в других формулах, например, в вычислениях с использованием уравнения Пуассона.

Следует заметить, что Mathcad позволяет работать не только с безразмерными величинами, но и с размерными. Эту возможность при выполнении контрольной работы использовать не обязательно, так как единицы измерения будут написаны по-английски. Вы можете просто вводить единицы измерения как текстовые комментарии.

Графики строятся с помощью Mathcad чрезвычайно просто. Для этого на панели **Math** необходимо щелкнуть левой клавишей мыши по значку **Graph Toolbar**.

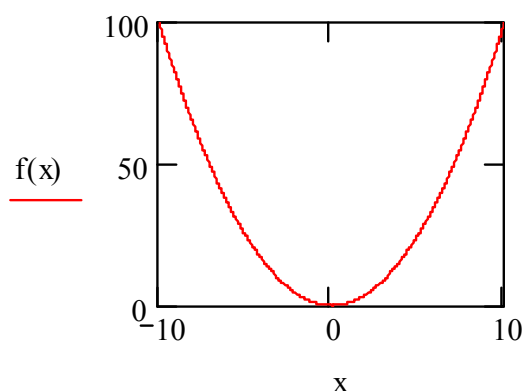
На рабочем листе появится панель **Graph**. Щелкните по значку **X-Y Plot**. Появится заготовка будущего графика.



Если щелкнуть мышкой в области графика, увидите сообщение об ошибке. Это и понятно, так как мы не указали, какой график нужно построить.

Построим график параболы. Для этого вводим функцию, график которой хотим построить, а в черные маленькие прямоугольники вводим аргумент и функцию. Сразу же получаем график:

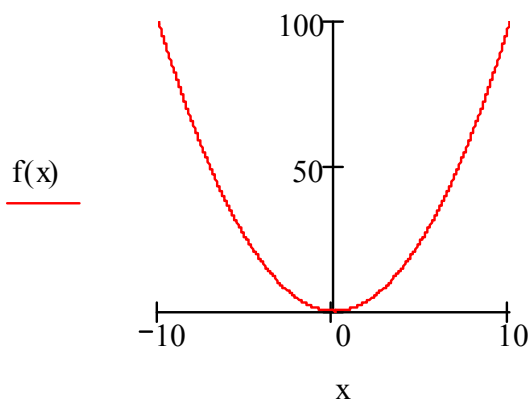
$$f(x) := x^2$$



По умолчанию график функции строится в диапазоне изменения аргумента от (-10) до 10 . Эти значения можно корректировать, нужно просто вместо 10 или (-10) ввести любые другие числа.

Стиль графика можно легко изменить. Для этого нужно установить курсор мыши на область графика и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. Появится новая панель **Formatting Currently Selected X-Y Plot**.

Поэкспериментируйте с этим меню. Например, отметив в этом меню точкой слово **Crossed**, получим график:



Теперь поместим курсор на график и один раз щелкнем левой клавишей мыши; затем на панели **Graph** найдем клавишу **<Trace>** и щелкнем по ней. Появится еще одна панель, озаглавленная **X-Y Trace**, а на графике — перекрестие двух пунктирных линий, которые перемещаются в области графика с помощью мыши. Отметим на панели **X-Y Trace** окошко **Track Data Points**. Теперь перекрестие пунктирных линий будет скользить по линии графика при перемещении мыши, а на панели **X-Y Trace** в соответствующих окошках мы увидим изменяющиеся значения аргумента и функции. Эту возможность Mathcad чрезвычайно удобно использовать для нахождения безопасных расстояний.

5. Использование табличного процессора MS Excel для термодинамических расчетов

MS Excel и его более поздние версии являются табличными процессорами, находящимися под управлением Windows, и предназначен для обработки данных с помощью формул. Табличный процессор создает на экране рабочий лист в виде таблицы, разграфленной на столбцы и строки.

Наверху рабочего листа приведены буквенные обозначения столбцов, сбоку указаны номера строк. Указание буквенного обозначения столбца и номера строки однозначно задают ячейку. Перемещаться по рабочему листу означает устанавливать указатель ячейки на другую ячейку за счет перемещения по строкам или столбцам при помощи клавиш управления курсором или манипулятором типа «мышь». Для быстрого перемещения можно использовать полосы горизонтальной или вертикальной прокрутки. Если при перемещении курсора нажата клавиша <Shift>, то будет происходить выделение группы ячеек для возможного удаления, копирования или перемещения их содержимого. Если перед значением ссылки стоит знак \$, то такая ссылка считается абсолютной, и при копировании ее значение не изменяется, в противном случае происходит автоматический пересчет координат.

Управление в MS Excel осуществляется с помощью меню, которое содержит различные команды. Выбор команд производится либо через меню программы, либо через контекстное меню. Различные управляющие элементы MS Excel (такие, как строка формул, строка состояния, панели инструментов) можно включать или выключать.

Базис, на котором создается модель для расчетов, состоит из трех элементов: чисел, формул и пояснительного текста. При вводе текста и чисел сначала устанавливают указатель ячейки на нужное место, затем вводятся данные. С помощью клавиш управления курсором или клавиши <Enter> после завершения ввода осуществляется переход на следующую ячейку. Ввод и последующая обработка данных могут происходить в строке формул или прямо в ячейке. Режим редактирования запускается двойным щелчком мыши в ячейке, обычным щелчком в строке формул или с помощью клавиши <F2>. Формулы в MS Excel всегда начинаются со знака равенства. Функция суммирования завершается указанием в скобках области, из которой будут извлекаться числа.

Для сохранения файлов используются из меню **File** (Файл) команды команда **Save** (Сохранить как) (для первого сохранения либо для сохранения под новым именем) или в меню **File** (Файл), команда **Save** (Сохранить) (для повторного сохранения под старым именем), а также кнопка **Save** (Сохранить) на панели инструментов.

Вся рабочая книга должна быть сохранена в формате Microsoft Excel **Workbook** (Рабочая книга), при этом имени файла присваивается расши-

рение xls. Для активизации рабочей книги используется панель инструментов или в меню **File** (Файл) команда (Открыть).

Для изменения текущего диска и каталога (директории) используется диалоговое окно в меню **File** (Файл) команда **Open** (Открыть). Рабочая книга состоит из нескольких рабочих листов. Рабочая книга является файлом, рабочий лист — нет. Целесообразно листы, объединенные одной темой собрать в отдельную книгу.

Окна рабочей книги могут делиться на две или четыре малых области, управление производится через меню **Window** (Окно) командой **Split** (Разделить), можно также ввести разделение рабочей книги на два окна с помощью меню **Window** (Окно) команды **New Window** (Новое окно). Можно ввести фиксацию части столбцов рабочей книги, при этом при перемещении курсора будут прокручиваться только нефиксированные столбцы.

При выходе из MS Excel программа запрашивает необходимость сохранения сделанных изменений в рабочей книге. Текстовая информация, длина которой больше ширины столбца, вводится полностью. Если соседняя ячейка свободна, то эта информация «накладывается» на неё. Если для вывода числового значения не хватает ширины столбца, то выводится информация в виде знаков решетки. В обоих случаях можно изменить ширину столбца, для чего увеличить или уменьшить размеры верхней ячейки столбца, или с помощью меню **Format** (Формат) команда **Column** (Столбец) сделать автоматическую оптимальную установку ширины столбца, при этом ширина столбца измеряется в символах. Можно также установить стандартную ширину столбца с помощью меню **Format** (Формат) команды **Column** (Столбец), а затем команда **Auto Fit Selection** (Подгон ширины). Изменение высоты строки может осуществляться с помощью меню **Format** (Формат) команды **Row** (Строка), а затем **Height** (Высота). Выравнивание текста в ячейке можно осуществлять с помощью кнопок панели инструментов форматирования. Одна или несколько ячеек могут содержать обрамления, которые задаются с помощью панели обрамления. Все виды форматирования, а также параметры ячейки выбираются с помощью диалогового окна **Format Cells** (Формат ячеек).

MS Excel предоставляет возможность автоматически через определенные промежутки времени сохранять или не сохранять произведенные изменения. Опции во вкладках с ярлычками **View** (Вид) и **General** (Общие) отличаются только тем, что в первом случае изменения относятся только к активному рабочему листу, а во втором — ко всей рабочей книге.

MS Excel поддерживает практически все арифметические, алгебраические, тригонометрические и логические функции. Например, логическая функция IF (Если) используется для того, чтобы в зависимости от выполнения каких-либо условий производить вычисления с данными. В качестве операторов в ней можно применять арифметические операции (+, -, *, /),

а также устанавливать порядок выполнения операторов с помощью скобок ((,)). Имена функций (IF) и ссылки ячеек (RC[1]) лучше вводить строчными (маленькими) буквами. В том случае, когда программа воспринимает введенную информацию как формулу, она будет выводить ее в поле обработки прописными (большими) буквами. Это облегчает работу и помогает нахождению ошибок в формулах. Функции можно вводить прямо в строке формул, т. е. непосредственно в ячейку или с помощью **Function Wizard** (Мастер функций). Данная опция оказывает помощь при задании аргументов функций. Функции названы мнемоническими именами, которые близки к содержательным именам этих функций, кроме того, функции могут использовать в качестве аргументов другие функции и адреса ячеек. Имеются также проверочные функции, позволяющие оценить информацию, которая введена в ячейку. Они обычно используются в условных конструкциях (IF-функциях).

При формировании разветвленных алгоритмов вычислений часто приходится использовать ссылки. Ссылки являются формализованным указанием отношения ячеек друг к другу, используются два типа ссылок: относительная и абсолютная. При абсолютной ссылке указывается точный адрес ячейки в таблице, а при относительной ссылке указывается расстояние от ячейки ввода.

Для уменьшения трудоёмкости при написании программ на MS Excel можно использовать копирование. Копировать и перемещать содержимое ячеек можно с помощью мыши. Для этого используется нижний правый угол области выделения (черный квадратик) или рамка указателя ячейки. Переместить значит вырезать содержимое одной ячейки и поместить это содержимое в другую ячейку. Вкладка **Edit** (Правка) диалогового окна **Options** (Параметры) меню **Tools** (Сервис) позволяет установить параметры выполнения операций, которые удобны для данной работы. Содержимое ячейки разрешается также копировать, перенося из одного рабочего листа или книги в другой рабочий лист или книгу. Это осуществляется с помощью функций **Windows**, которая позволяет заносить данные во временный буфер памяти, а затем копировать их. Можно использовать ссылки для переноса данных из одних рабочих книг в другие. Для указания ячеек можно использовать функцию **Indirect** (ДВССЫЛ). При использовании этой функции должны быть открыты файлы, к которым эта функция обращается, в противном случае она не работает. С помощью функции **Concatenate** (Сцепить) можно объединять разные текстовые и численные данные в одно текстовое выражение.

Все численные значения должны иметь поле описания, которое может находиться в соседней ячейке, в заголовке столбца или в первой ячейке строки, при этом для большинства таблиц необходимо вводить расчетные формулы, которые изменяются от модели к модели. Если определенным ячейкам присвоены имена, то это облегчает проведение расчётов.

С помощью меню **Edit** (Правка) команды **Replace** (Заменить) можно найти одну последовательность символов и заменить её другой.

Для лучшей читаемости программы полезно с помощью меню **Insert** (Поместить) команды **Note** (Примечание) ввести в ячейку примечания, которые не будут показываться на рабочем листе. Увидеть эти примечания, проследить зависимости между ячейками или формулами, определить место нахождения возможной ошибки, быстро получить справку об атрибутах ячейки можно при помощи специального окна информации. Еще удобнее обнаруживать ошибки с помощью панели **Auditing** (Зависимости). Поскольку она показывает влияющие и зависимые ячейки, то локализация ошибки происходит быстро. Чем больше информации содержит рабочий лист, тем эффективнее работа этого инструмента.

Результаты расчетов удобно представлять в виде графиков и диаграмм, которые легко получать, выделяя введенные в таблицу данные и осуществлять вывод на экран новой диаграммы на новый рабочий лист с помощью ярлычка рабочего листа. Сразу появляется **Chart Wizard** (Мастер диаграмм), который быстро создает диаграмму.

В диаграммы можно вставлять поясняющие элементы, заголовки, наименования осей, планки погрешностей и т. д. Элементы диаграммы можно подвергать форматированию, изменять шрифты, цвет, перемещать объекты или изменять их размеры. Можно вставлять диаграмму, а также в любые места рабочего листа другого типа различные знаки с помощью панели инструментов **Drawing** (Рисование). С помощью процедуры форматирования можно переходить к другому типу диаграммы или к вариантам одного и того же типа.

При первых шагах работы в MS Excel полезно использовать специальный инструмент **Tip Wizard** (Мастер подсказок). Применение этого инструмента помогает избегать длинных путей при выполнении команд. Например, часто используется меню, чтобы выполнить команду, хотя гораздо проще и быстрее выполнить ее с помощью одного нажатия клавиши быстрого вызова. Например, для запуска команды **Go To** (Перейти) предназначена клавиша <F5>.

Мастер подсказок говорит об этом с помощью небольшой справки в текстовом поле, которое можно листать, если оно активизировано. При этом информация Мастера подсказок является краткой, однако, если этой информации недостаточно, необходимо щелкнуть мышью, установив курсор на кнопку **Help** (Справка). Вид этой кнопки — лампочка со знаком вопроса.

6. Использование электронной почты для отсылки контрольной работы

Если при оформлении контрольной работы использовался персональный компьютер, то её электронная версия в виде файла формата *.DOC, (использовался редактор текст WORD), *.XLS, (использовалась электронная таблица EXCEL) или *.MCD (использовалась математическая система MATHCAD) может быть отправлена при помощи электронной почты в адрес заочного отделения или непосредственно преподавателя, электронные адреса при этом уточняются непосредственно на установочных лекциях.

Название файла зависит от операционной системы, в которой выполнен этот файл. Если использовалась DOS и WINDOWS 3.11, то название файла должно записываться латинскими буквами, его величина не должна превышать 8 знаков. В этом случае имя файла должно состоять из номера зачетной книжки и сокращенного названия дисциплины или раздела, по которой выполнена контрольная работа. Например, если слушатель Андреев имеет номер зачетной книжки В9806 и выполнил контрольную работу по разделу «Техническая термодинамика» с использованием электронной таблицы EXCEL, то файл следует назвать следующим образом: V9806TD.XLS. Если же, тот же слушатель выполнил контрольную работу по разделу «Теплопередача в пожарном деле» с использованием редактора текст WORD, то такой файл следует назвать: V9806TP.DOC.

При использовании платформы WINDOWS 95, или её более поздние версии, то в названии файла можно использовать и кириллицу, кроме того, число знаков в названии файла не ограничено. В этом случае имя файла должно состоять из номера зачетной книжки, фамилии слушателя и сокращенного названия дисциплины или раздела по которой выполнена контрольная работа. В качестве разделителя лучше использовать знак < - >. Таким образом, слушатель Андреев может назвать свой файл: В9806_Андреев_ТД.DOC.

Если слушатель имеет постоянный доступ к ресурсам INTERNET и его провайдер (поставщик услуг INTERNET) обеспечивает ему работу электронной почты, то целесообразно использовать тот адрес, который был определён провайдером. Обычно такой адрес имеет формат <Имя клиента>@<Имя провайдера>.<Название домена>. Например если вы пользуетесь услугами российской фирмы SITEK и она назначила Вам имя (Login) aD123G, то Ваш электронный адрес будет: aD123G@sitek.ru.

Если Вы не имеете постоянного провайдера (то есть поставщика услуг INTERNET) или пользуетесь сетевыми ресурсами периодически, то целесообразно получить персональный электронный адрес в одной из многочисленных бесплатных электронных почт. Здесь будет приведен пример работы с популярной российской бесплатной электронной почтой MAIL.

Несмотря на то, что почта MAIL русифицирована, в адресе можно использовать только латинские буквы, поэтому персональный электронный адрес слушателя Андреева с номером зачетной книжки В9806 может выглядеть как: **v9806andreev@mail.ru**. Указание номера зачетной книжки перед или после фамилии делает этот адрес уникальным для данной почты.

Для регистрации своего адреса необходимо, прежде всего, войти в сеть, загрузить INTERNET EXPLORER и в строке **Адрес** набрать электронный адрес русской почты: **http://WWW.mail.ru**. При этом после соединения с сервером электронной почты MAIL на экране появится приглашение ввести свой электронный адрес, а так же пароль и его подтверждение. Внимание! Мы настоятельно рекомендуем Вам не использовать в пароле русских букв, это поможет Вам избежать многих ошибок. Убедитесь, что при вводе пароля у Вас не включена русская раскладка клавиатуры. В качестве подтверждения целесообразно использовать пароль.

Далее необходимо перейти к новой опции — **Проверка пароля (секретный вопрос)**. Выберите вопрос, правильный ответ на который знаете только Вы. В случае, если Вы забудете пароль, система задаст Вам этот вопрос и сообщит пароль в случае правильного ответа. Мы не рекомендуем Вам использовать в качестве секретного вопроса «Город, в котором Вы родились» и «Ваш рост», так как в этом случае ответ может быть легко угадан и Ваш пароль может быть изменен другими.

После этого заполняется группа записей «**О пользователе**»:

e-mail адрес (если есть). Он будет использоваться, чтобы связаться администратору почты с Вами в случае возникновения проблем с Вашим адресом на mail.ru (например: забытый пароль). Далее вводятся **Имя, Фамилия, Пол, Регион, Город**. Поля, обязательные для заполнения, обозначены значком #. Если Вы обнаружили ошибку ввода начальных данных, можно нажать на кнопку **Стереть все**, если начальные данные введены правильно, нажимается кнопка **Зарегистрироваться**, при этом появляется сообщение «Пользователь **login** успешно зарегистрирован. Теперь Ваш адрес электронной почты **login@mail.ru**. Для начала работы с Вашей почтой Вы должны **войти** в систему MAIL.RU.». Для входа в эту систему необходимо совместить курсор мыши со словом «**войти**» и при появлении вместо курсора изображения ладони дважды быстро нажать левую кнопку мыши.

Для того, чтобы переслать уже сформированный файл со своей контрольной работой в адреса заочного отделения и кафедры, необходимо в левой части экрана найти опцию **Написать письмо**, совместить курсор мыши с этой опцией и при появлении вместо курсора изображения ладони дважды быстро нажать левую кнопку мыши. В верхней части экрана под сообщениями «**Написать письмо**» и «**От: <Ваша фамилия и имя> <login@mail.ru>**» в окно **Кому:** необходимо ввести электронный адрес отделения заочного обучения, можно указывать несколько адресов, разделяя их запятыми, в окно **Копия:** — электронный адрес преподавателя, в окно **Те-**

ма: — свою фамилию, инициалы и название дисциплины, по которой выполнена контрольная работа. В большое окно в режиме редактора текста можно набрать необходимые комментарии, просьбы или вопросы к преподавателю.

Далее необходимо к Вашему сообщению прикрепить файл собственно контрольной работы. Для этого необходимо нажать на кнопку **Обзор**, находящуюся под текстом основного сообщения в нижней части экрана. После того, как необходимый файл найден на соответствующем магнитном носителе, последовательно нажимаются кнопки **Прикрепить** и **Отправить**. Каждый файл не может превышать 500 Kb. К одному письму можно прикрепить до 4 файлов. Если Вы не видите кнопку **Browse... (Обзор)**, то Ваш браузер не поддерживает прикрепление файлов. При работе с электронной почтой может возникнуть ряд проблем. Решение некоторых из них приведено ниже.

Для входа в систему необходимо правильно ввести имя пользователя и пароль. Пароль должен быть введен в точности как при регистрации — с соблюдением больших и маленьких букв, непременно в том же регистре, что и при регистрации (если при регистрации ваша клавиатура случайно находилась в русской раскладке или был нажат **CapsLock**, воспроизвести свой пароль Вы сможете, переключив клавиатуру в такой же режим, или попробовав различные возможные комбинации: [**Rus**], [**CapsLock**], [**CapsLock + Rus**]). Выход из системы происходит при нажатии кнопки «Выход» или по прошествии двух часов с момента последнего запроса к серверу. Даже если Вы закроете все окна браузера, не нажав кнопку «**Выход**», любой человек, запустивший браузер на вашем компьютере в течение 2 часов сможет прочитать Вашу почту. Будьте внимательны.

Если Вы забыли свой пароль, воспользуйтесь системой напоминания пароля. Вам придется ответить на несколько вопросов, подтвердив тем самым, что это действительно Ваш ящик. В случае успеха Вы сможете установить себе новый пароль

Может быть ситуация, при которой Вы не можете зарегистрировать нужное имя. В чем дело?

Если имя пользователя (**Login**) уже использовано на нашем сервере, то Вам не удастся создать себе адрес с таким же именем. Если вы хотите использовать свое настоящее имя или фамилию, а нужное имя занято — попробуйте ввести его, используя дополнительные буквы или цифры.

Например, если адрес vasya@mail.ru уже использован, попробуйте назваться как vasya_super@mail.ru

Если Вы не можете войти — пароль, который Вы вводили при регистрации, не работает. Наиболее частая причина — ввод пароля русскими буквами при регистрации. Попробуйте для входа на mail.ru также переключиться на русский язык и ввести пароль так, как Вы его запомнили. Если это не помогает, проверьте, не вводили ли Вы пароль с включенной кнопкой **Caps Lock** (пароли test и TEST — это разные пароли). Если же ничего не помогает, пришлите письмо на support@mail.ru, в котором укажите Ваш **Login**, имя, фамилию и e-mail, которые Вы вводили при регистрации. При этом, если Вы смогли войти переключившись на русский язык (то есть Ваш пароль состоит из русских букв), мы рекомендуем Вам изменить пароль и не использовать в нем русских букв. Изменить пароль Вы можете в «Настройках пользователя».

При выдаче на сервере сообщения «**Ошибка записи cookie**» — скорее всего в Вашем браузере отключена опция «**Принимать файлы cookie**». Включить её можно следующим образом: в меню выберите **Вид > Свойства обозревателя**. В разделе **Дополнительно** установите опцию **Всегда принимать файлы cookie**. Кроме этого, известны случаи, когда подобные проблемы возникали, использовался WebCelerator. Если Вы используете этот ускоритель (или другой подобный), попробуйте отключить его — вполне вероятно это поможет. Если же Вы не используете никаких ускорителей и в браузере все настроено, как следует, остается предположить, что Вы используете проху-сервер для выхода в Интернет и этот проху-сервер некорректно обрабатывает cookies. Если есть возможность, попробуйте выходить в Интернет напрямую (без проху) — по крайней мере, это поможет выяснить, в этом ли проблема. И, наконец, попросите своего системного администратора (или провайдера) разобраться с проблемой — скорее всего ошибка именно в Вашем проху-сервере.

Если при попытке забрать почту с MAIL.RU, почтовая программа выдает «**Ошибка Сокета**», то, скорее всего, это результат временного сбоя в сети или на сервере. Попробуйте забрать почту ещё раз через несколько минут, скорее всего, всё будет в порядке.

Если же ошибка повторяется, пожалуйста, напишите по адресу на <mailto:%20support@mail.ru> — обязательно опишите, в какой момент возникает проблема, и приведите полный текст ошибки.

Если Вам прислали почту, но Вы не можете её прочитать, то возможны три варианта.

- Если Вы вообще не видите русских букв, а видите только иероглифы, то Вам необходимо настроить русские шрифты в браузере.
- Если же Вы видите русские буквы, но они представляют собой бессмысленные сочетания, попробуйте при чтении письма воспользоваться ссылками переключения кодировки (расположены над письмом — "**win**",

"koi", "dos" и т. д.). Если ни одна из них не помогает, письмо было дважды перекодировано по пути к Вам — не нами, а скорее всего почтовым сервером отправителя. Такие письма читать без специальных программ невозможно.

- Если Вы не можете прочитать только одно письмо, то вопрос о кодировках Вам лучше согласовать с его отправителем.

Если посылаете слишком много писем сразу, то программа выдает ошибку. Для защиты от массовых рассылок (SPAM) на сервере MAIL.RU установлены ограничения на количество писем, которое можно послать через smtp сервер за короткое время. Попробуйте послать оставшиеся письма через 15 минут. Убедитесь также, что в настройках почтовой программы, с помощью которой Вы пытаетесь отправить письма, в поле **From** установлено правильное значение **login@mail.ru**. Smtп сервер почты обрабатывает только письма, подписанные существующими адресами **@MAIL.RU**. Возможно, само письмо было слишком большим. SMTP сервер посылает письма размером до 1 Мб.

Надо иметь в виду, что после входа на mail.ru, кто угодно может читать мою почту с Вашего компьютера. Как избежать этого эффекта? Дело в том, что когда Вы входите на сервер почты и сообщаете ему свой login и пароль, сервер запоминает Ваш компьютер, чтобы не приходилось пересылать по сети login и пароль при каждом обращении к серверу. Сервер помнит Ваш компьютер в течение двух часов (все это время Вы можете заходить на mail.ru без указания login и пароля). Вы можете воспользоваться кнопкой «**Выход**» (расположенной слева, под кнопками «**Настройки**» и «**Адреса**») для того, чтобы сервер «забыл» Ваш компьютер сразу. После нажатия этой кнопки любая попытка зайти на mail.ru будет требовать повторного ввода login и пароля.

Некоторые советы по работе с web интерфейсом. Прежде всего, что такое фильтры и как с ними работать?

Фильтры для входящей почты позволяют Вам выделять из всего потока входящих писем некоторые и производить с ними те или иные действия автоматически. Например, Вы можете сделать так, что все письма, приходящие от **fizika@mail.ru** будут автоматически складываться в папку **fizika**. Другой пример: если Вы не хотите общаться с каким-то человеком, Вы можете создать оригинальный фильтр, который на все его письма будет отвечать сообщением об ошибке «**Такого пользователя не существует**». Создавать новые фильтры и управлять старыми можно в разделе **Настройки — Фильтры**. Обратите внимание: когда у Вас несколько фильтров, особую роль начинает играть порядок, в котором эти фильтры применяются, так как одно письмо может удовлетворять нескольким фильтрам и соответственно, может быть обработано по-разному. Используйте ссылки «**Вверх**» и «**Вниз**» в списке фильтров, чтобы управлять порядком применения фильтров. Редактируя фильтр, Вы также може-

те использовать опцию **«Применять фильтры ниже по списку»**, чтобы определить, следует ли запускать другие фильтры после этого.

Для удобства работы с почтой Вы можете раскладывать письма в папки на **mail.ru**. Если при этом Вы используете POP3 сервер и забираете все письма, по умолчанию они будут забраны изо всех папок сразу. Вам нужно установить флажок **«Сделать недоступной для POP3»** в **«Редактировании папки»**, чтобы письма из неё не забирались автоматически.

В системе также предусмотрена записная книжка — добавлять туда адреса можно, нажав на кнопку **«В адреса»** при прочтении письма, либо прямо в режиме её просмотра. Раскладывая письма по папкам, помните об ограниченном размере ящика. Кнопки **«Переадресовать»** и **«Переслать»** отличаются тем, что при **«Переадресации»** письмо сохранит своего первоначального отправителя и будет доставлено в неизменном виде. **«Переслать»** более похоже на **«Ответить»** — у Вас будет возможность приписать к письму свои комментарии, и послано оно будет от Вашего имени.

Кнопку **«Скачать»** используют, чтобы скачать или посмотреть только часть письма, имеющего сложную структуру. Иногда бывает удобно использовать её, чтобы распечатать текст письма без заголовка. Нажав на заголовок столбца, при просмотре списка писем Вы можете сортировать его по соответствующему полю. (Также можно сортировать записи в записной книжке). Нажав ещё раз по этому же полю, но в обратном порядке. Нажав на букву "N" в верхнем левом углу списка Вы можете сортировать письма в порядке их прибытия на **mail.ru** (или в обратном).

При настройке интерфейса:

- **«Список Ваших e-mail адресов»** — адреса из этого списка не будут использоваться при ответе на письма.
- **«Количество писем на страницу»** — максимальное количество заголовков, показываемое в одной странице списка писем.
- **«Длина строки»** — строки длиннее указанного количества символов будут переноситься.
- **«Пересылка/Ответ»** — Здесь Вы можете установить, включать или нет содержимое исходного письма при ответе или пересылке. Кроме этого, Вы можете указать, каким способом выделять текст включаемого письма.
- **«Подпись»** — здесь Вы можете ввести подпись, которая будет автоматически добавляться ко всем исходящим письмам.

8. ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Степень черноты полного излучения некоторых веществ и материалов

Материал и характер поверхности	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Алюминий полированный	225— 575	0,09— 0,057
Асбестовая бумага	40—370	0,93— 0,95
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовый шифер	20	0,96
Бумага	20	0,8— 0,9
Вода	0—100	0,95— 0,96
Древесина строганная	20	0,8— 0,9
Кирпич красный шероховатый	20	0,93
Кирпич шамотный глазурованный	1100	0,75
Латунь полированная	245— 375	0,028 —0,04
Медь полированная	115	0,023
Сталь полированная	425- 1020	0,144 —0,38
Сталь оцинкованная	28	0,288
Сталь луженая	25	0,043 —0,06
Сталь шлифованная	940— 1100	0,52— 0,61
Стекло	22	0,94
Толь кровельный	20	0,93
Штукатурка известняковая	10—20	0,91

Степень черноты факела пламени при горении некоторых веществ

Пламя	$\epsilon_{\text{ф}}$
Несветящееся пламя газового фонтана	0,3
Несветящееся пламя антрацита при слоевом сжигании, несветящееся газовое пламя	0,4
Светящееся пламя антрацитовой пыли	0,45
Светящееся пламя тощих углей	0,6
Светящееся пламя мазута	0,85
Светящееся пламя бензина	0,96— 0,99
Светящееся пламя каменных, бурых углей, древесины и торфа	0,7

Температура факела пламени при горении некоторых веществ

Горючий материал	<i>T</i>₀, <i>K</i>
Бензин в резервуарах	1473
Газонефтяной фонтан	1127— 1357
Древесина	1047— 1147
Древесина в штабелях пиломатериалов	1127— 1317
Дизельное топливо и нефть в резервуарах	1373
Диэтиловый эфир	1207
Каучук	1247
Керосин тракторный в резервуарах	1373
Мазут в резервуарах	1273
Нефть и нефтепродукты в резервуарах	1107— 1207
Резинотехнические изделия	1473
Торф	1027— 1067
Этиловый спирт	1147— 1177

Приложение 4

Критическая плотность облучения и предельно допустимая температура нагрева некоторых горючих материалов

Материал	$t_{\text{доп}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{св}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$q_{\text{кр}}, \text{ Вт/м}^2$
Войлок строительный	80	370	–
Торф кусковой	80	225	9800
Торф брикетный	80	225	13300
Древесина сосновая шероховатая	80	295	12800
Древесина, окрашенная масляной краской	100	295	17500
Фанера, минераловатные плиты	120	–	–
Резина	–	–	14500
Пластик слоистый	120	480	15400
Хлопок-волокно	120	205	7500
Горючие газы и огнеопасные жидкости	–	150	8900

Физические свойства жидкостей

Жидкость, температура, °C	Плотность, кг/м ³	Теплоем- кость, Дж/(кг·°C)	Вязкость·10 ⁵ , м ² /с	Теплопро- водность, Вт/(м·°C)	Pr
Вода					
0	1002,28	4218	1,788	0,552	13,6
20	1000,52	4182	1,006	0,597	7,02
40	994,59	4178	0,658	0,628	4,34
60	985,46	4184	0,478	0,651	3,02
80	974,08	4196	0,364	0,668	2,22
100	960,63	4216	0,294	0,680	1,74
Дифенильная					
смесь	995	1880	1,01	0,126	15,0
	970	2010	0,746	0,121	12,0
100	945	2170	0,574	0,116	10,3
	912	2340	0,446	0,111	8,6
130					
160					
200					
Метилловый					
спирт	791	2470	0,69	0,21	6,84
20	765	2530	0,52	0,207	4,98
50					
Фреон					
0	1397,45	934,5	21,4	0,073	3,8
10	1364,30	949,6	20,3	0,073	3,6
20	1330,18	965,9	19,8	0,073	3,5
30	1295,10	983,5	19,4	0,071	3,5
40	1257,13	1001,9	19,1	0,069	3,5
50	1215,96	1021,6	19,0	0,067	3,5
Масло					
0	899,12	1796	4280	0,147	47410
20	888,23	1880	900	0,145	10400
40	876,05	1964	240	0,144	2870
60	864,04	2047	83,9	0,140	1050
80	852,02	2131	37,5	0,138	490
100	840,01	2219	20,3	0,137	276

Приложение 6

Теплофизические параметры строительных материалов

Название материала	Плотность, <i>кг/м³</i>	Теплопроводность, <i>Вт/(м·°С)</i>	Теплоемкость, <i>кДж/(м·°С)</i>
Аглоперлитобетон	1670	0,7 + 0,00007 <i>t</i>	0,87 + 0,00059 <i>t</i>
Бетон на гранитном щебне	2220	1,42 – 0,00011 <i>t</i>	0,77 + 0,00063 <i>t</i>
Бетон на известняковом щебне	2190	1,25 – 0,000096 <i>t</i>	0,77 + 0,00063 <i>t</i>
Бетон песчаный	1900	1,05 – 0,00058 <i>t</i>	0,77 + 0,00063 <i>t</i>
Газобетон на молотом песке	480	0,093 + 0,00007 <i>t</i>	0,92 + 0,00063 <i>t</i>
Газобетон на молотом песке	750	0,181 + 0,000081 <i>t</i>	0,92 + 0,00063 <i>t</i>
Керамзитобетон	950	0,23 + 0,0000133 <i>t</i>	0,84 + 0,00058 <i>t</i>
Керамзитобетон	1030	0,256 + 0,000075 <i>t</i>	0,84 + 0,00039 <i>t</i>
Керамзитобетон	1380	0,385 + 0,000081 <i>t</i>	0,92 + 0,00063 <i>t</i>
Кирпич красный	1580	0,455 + 0,000232 <i>t</i>	0,84 + 0,00042 <i>t</i>
Кирпич силикатный	1730	0,79 + 0,00035 <i>t</i>	0,84 + 0,00063 <i>t</i>
Перлитобетон	1090	0,29 + 0,000116 <i>t</i>	0,84 + 0,00058 <i>t</i>

Приложение 7

Пример интерполяции табличных данных

<i>t, °С</i>	<i>P, бар</i>	<i>C_p, кДж/кг·К</i>	<i>λ, Вт/м·К</i>	<i>V·10⁶, м²/с</i>	<i>Pr</i>
0	0,006108	4,212	0,561	1,789	13,07
10	0,012271	4,191	0,575	1,306	9,52
20	0,023370	4,183	0,599	1,006	7,02

Необходимо определить значение числа Прандтля для температуры 12 °С.

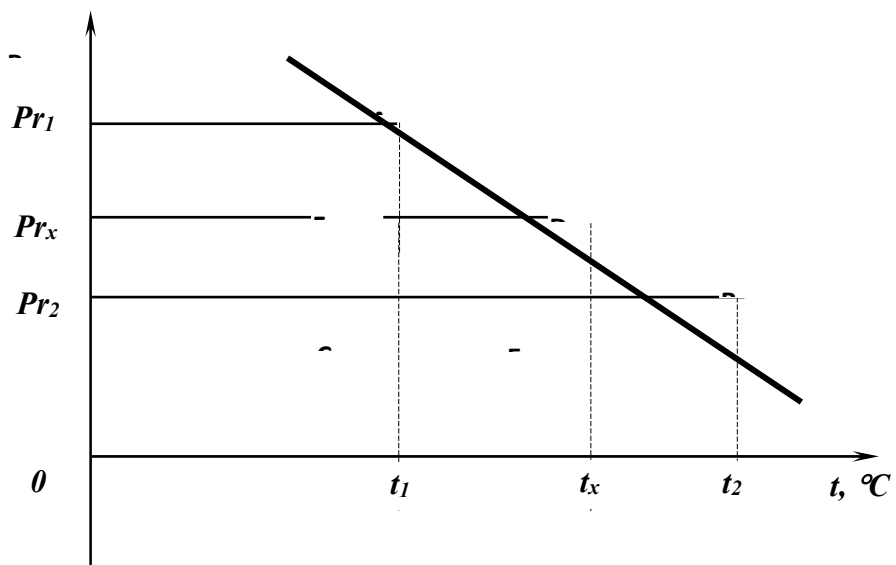
Тогда, учитывая подобие треугольников ABC и DBE, можно утверждать, что AC/BC=DE/BE или $\frac{Pr_1 - Pr_2}{t_2 - t_1} = \frac{Pr_x - Pr_2}{t_2 - t_x}$.

После несложных преобразований получаем:

$$Pr_x = \frac{t_2 - t_x}{t_2 - t_1} (Pr_1 - Pr_2) + Pr_2$$

или
$$Pr_2 = \frac{12 - 10}{10 - 0} \cdot (13,02 - 9,52) + 9,52 = 10,23.$$

При интерполяции других параметров поступают аналогичным образом.



9. ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. — М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. — 444 с.
2. Теплотехника под ред. Г.А. Матвеева, — М., «Высшая школа», 1981 — 480 с.
3. Задачник по термодинамике и теплопередаче/ Под ред. Ю.А. Кошмарова. Части 1, 2 и 3 — М.: ВИПТШ МВД РФ, 1996.

Дополнительная литература

1. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика и теплопередача. — М.: Высшая школа, 1988.
 2. Теория тепломассообмена/ Под ред. А.И. Леонтьева. — М.: Высшая школа, 1979.
 3. Амосов Г.Я., Шевляков А.Н. Методические указания по применению математических методов и вычислительной техники при решении задач лучистого теплообмена. — М.: ВИПТШ МВД СССР, 1981.
 4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1974.
 5. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1988.
 6. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975.
 7. Афанасьев В.Н., Афонин А.А., Исаев С.И. и др. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче. — М., Высшая школа, 1988.
 8. Астапенко В.М. и др. Термогазодинамика пожаров в помещениях. — М.: Стройиздат, 1988.
 9. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров. — М.: КомпьютерПресс, 1988.
- Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. — М.: "Нолидж", 1998.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Термодинамика	5
2. Теория тепломассообмена и промышленная теплотехника	33
3. Контрольные задания	60
ЗАДАНИЕ 1. Расчет времени образования взрывоопасной концентрации	60
ЗАДАНИЕ 2. Термодинамический расчет цикла двигателя внутреннего сгорания	64
ЗАДАНИЕ 3. Определение времени безопасной работы личного состава в зоне интенсивного теплового излучения	68
ЗАДАНИЕ 4. Расчет толщины защитной гильзы	72
4. Использование математической системы Mathcad для решения задач термодинамики и теплопередачи	76
5. Использование табличного процессора MS Excel для термодинамических расчетов	80
6. Использование электронной почты для отсылки контрольной работы	84
7. Приложения	90
Литература	95

Под общей редакцией
Владимира Сергеевича Артамонова
*доктора военных наук, доктора технических наук, профессора,
заслуженного работника высшей школы Российской Федерации,
лауреата премии Правительства Российской Федерации
в области науки и техники*

Михаил Николаевич Акимов
кандидат физико-математических наук, доцент;
Анатолий Алексеевич Кузьмин
кандидат педагогических наук, доцент;
Николай Николаевич Романов
кандидат технических наук, доцент

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания по самостоятельному изучению
дисциплины и выполнению контрольных работ
для заочной формы обучения
по специальности 280104.65 – «Пожарная безопасность»

Печатается в авторской редакции
Ответственный за выпуск М.Н. Акимов

Подписано в печать 00.00.2011

Формат 60×84 1/16

Печать трафаретная

Объем 4,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149