

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
(МИИТ)

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru

Кафедра «Теплоэнергетика и водоснабжение на железнодорожном транспорте»

Автор: Драбкина Е.В , кандидат технических наук, доцент

Приложение 2 к рабочей программе

ТЕМАТИКА КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

«ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ»

Направление/специальность **270800.62 Строительство**
Профиль: **Водоснабжение и водоотведение**
Квалификация (степень) выпускника **Бакалавр**
Форма обучения **заочная**

| | |
|--|--|
| | <p>Утверждено на заседании кафедры</p> <p>Протокол № _____</p> <p>« ____ » _____ 20__ г.</p> <p>Зав. кафедрой _____ Р.А. Кузьминский</p> |
|--|--|

Москва 2012 г.

ВВЕДЕНИЕ

Контрольные работы нацелены на повышение эффективности и практической направленности обучения студентов. Выполнение контрольных работ содержит элементы исследования и способствует выработке навыков в принятии обоснованных технических решений.

Студенты выполняют 1 контрольную работу, которая содержит решение задач по следующим разделам:

Раздел 1 «Техническая термодинамика»;

Раздел 2 «Основы теплопередачи»;

По разделу 1 необходимо решить 4 задачи, по разделу 2 необходимо решить 4 задачи.

Для каждой задачи дано десять вариантов исходных данных. Номер варианта выбирается по последней цифре учебного шифра.

К каждой контрольной работе даются методические указания к решению задач.

Выполнению контрольных работ должно предшествовать изучение теоретических основ соответствующего раздела курса с использованием рекомендуемой литературы.

Контрольная работа может быть оформлена либо письменно на бумажном носителе, либо в электронно-цифровой форме на диске (CD). При представлении для рецензирования контрольной работы на электронном носителе (диске) студент обязан распечатать на бумажном носителе контрольную работу с титульным листом установленной формы и приложить к ней диск с содержанием работы. Титульный лист подписывается студентом, на нем производится регистрация работы. На титульном листе преподавателем проставляется отметка о допуске к защите и приводится рецензия контрольной работы.

При выполнении работ студент письменно либо в электронно-цифровой форме решает соответствующие шифры задачи.

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие условия:

Страницы рукописи должны быть пронумерованы.

Текст условия задачи следует приводить полностью.

Работу следует писать от руки чернилами или печатать на одной стороне листа.

Решения должны быть краткими, но исчерпывающими.

Решение задач вести поэтапно, с пояснением каждого хода решения.

При вычислении искомых величин необходимо написать расчетную формулу в буквенном выражении, подставить численные значения всех входящих в формулу параметров и привести окончательный ответ.

В приводимых расчетных формулах поясняют все входящие в них параметры.

Обозначения величин и терминология должны соответствовать принятым в учебниках.

У всех размерных величин должна быть проставлена размерность.

При решении задач следует строго следить за соблюдением единства размерностей величин, входящих в ту или иную расчетную зависимость.

Значение всех коэффициентов следует обосновать ссылкой на литературу с указанием автора, названия источника и номера страницы.

При оформлении ответов и решении задач обязательно выполнение необходимого иллюстрационного материала (графики, силовые и скоростные многоугольники, схемы потоков и т.д.).

Чертежи к работе, как правило, следует выполнять на миллиметровой бумаге и клеить или вшивать в работу.

При построении расчетных графиков нужно указать величины, откладываемые по осям графика, с обозначением их размерностей.

В конце работы привести список литературы, которой пользовался студент в процессе выполнения работы, с указанием автора, названия, места и года издания.

Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа.

К экзамену студент допускается только после получения зачета по контрольной работе и по лабораторным работам.

Раздел 1 «Техническая термодинамика»

Задача 1.1

Воздух, имея начальную температуру $t_1 = 27^\circ\text{C}$ и абсолютное давление p_1 , изотермически расширяется до давления $p_2 = 0.1$ МПа, а затем нагревается в изохорном процессе до тех пор, пока давление вновь не станет равным p_1 . Требуется определить удельный объем воздуха в конце изотермического расширения и температуру в конце изохорного подвода теплоты, а также изменения удельных значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Изобразить процессы в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| p_1 | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |

Задача 1.2

Смесь идеальных газов заданного массового состава занимает объем V при постоянном абсолютном давлении p и температуре t . Требуется определить газовую постоянную смеси, среднюю молекулярную массу, массу смеси, объемный состав смеси, а также среднюю мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси (при $p = \text{const}$) для интервала температур $0-t$.

| Массовый состав смеси, %: | Номер варианта | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| CO_2 | 18 | 14 | 10 | 17 | 10 | 10 | 12 | 16 | 13 | 18 |
| H_2O | 1 | 15 | 6 | 5 | 4 | 7 | 14 | 7 | 12 | 10 |
| N_2 | 65 | 45 | 76 | 70 | 80 | 60 | 47 | 62 | 54 | 46 |
| O_2 | 16 | 26 | 8 | 8 | 6 | 18 | 27 | 15 | 21 | 26 |
| $V, \text{ м}^3$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| $p, \text{ МПа}$ | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 |
| $t, \text{ C}^\circ$ | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 500 | 400 | 300 | 200 | 300 |

Задача 1.3

В дроссельном клапане парового двигателя водяной пар с начальными параметрами p_1 и t_1 дросселируется до давления 1 МПа, а затем адиабатно расширяется в цилиндре двигателя до давления 0,1 МПа. Определить потерю располагаемой работы пара вследствие дросселирования. Решение задачи проиллюстрировать в is -диаграмме.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| p_1 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3,5 | 3,5 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| t_1 | 300 | 350 | 400 | 450 | 300 | 350 | 400 | 350 | 300 | 400 |

Задача 1.4

Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, степень сжатия, термический КПД и полезную работу. Заданы характеристики цикла λ и ρ . В начальной точке цикла $p_1 = 0.1$ МПа и $t_1 = 67^\circ\text{C}$. Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна 600°C . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в pV и Ts -координатах.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| λ | 2,2 | 2,1 | 2 | 1,9 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 |
| ρ | 1,2 | 1,25 | 1,3 | 1,35 | 1,4 | 1,45 | 1,5 | 1,5 | 1,35 | 1,4 |

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ РАЗДЕЛА №1

Задачи 1,2

Задачи составлены по следующим разделам технической термодинамики: уравнение состояния идеального газа, смесь идеальных газов, теплоемкость, первый закон термодинамики и основные термодинамические процессы.

При решении этих задач могут быть использованы следующие формулы и выражения.

Уравнения состояния идеального газа:

$$pv = RT \quad (\text{для } 1 \text{ кг газа}),$$

или

$$pV = GRT \quad (\text{для } G \text{ кг газа}),$$

где $R = 8314/\mu$ - газовая постоянная, Дж/(кг К);

μ - масса 1 кмолья газа, кг (численно равна молекулярной массе газа).

Для газовых смесей вводят понятие о так называемой средней (кажущейся) молекулярной массе смеси, значение которой определяется по выражениям:

через объемные доли

$$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu_i,$$

через массовые доли

$$\mu_{\text{см}} = 1/\sum m_i/\mu_i,$$

где μ_i - молекулярная масса компонента, входящего в смесь;

$m_i = \frac{G_i}{G}$ - массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входящего в смесь, к массе всей смеси);

$r_i = \frac{V_i}{V}$ - объемная доля (отношение приведенного объема

какого-либо газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси:

$$r_i = m_i \mu_{см} / \mu_i ; \quad m_i = r_i \mu_i / \mu_{см}.$$

Газовую постоянную смеси идеальных газов R можно определить через газовые постоянные отдельных компонентов R_i , входящих в смесь,

$$R = \sum_1^n m_i R_i$$

или через среднюю молекулярную массу смеси :

$$R = 8314 / \mu_{см} \text{ Дж / (кгК)}.$$

Для определения парциального давления отдельного компонента p_i , входящего в смесь, служат формулы

$$p_i = r_i P \quad \text{и} \quad p_i = m_i P \frac{R_i}{R}$$

где p - общее давление смеси газов;

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают:

мольную теплоемкость μc , кДж/(моль-К),

массовую — c , кДж/(кгК)

объемную — c' , кДж/(м³-К).

Объемную теплоемкость относят к 1 м³ при нормальных условиях ($p_0 = 760$ мм рт. ст., $t_0 = 0^\circ\text{C}$). Эти теплоемкости между собой связаны следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0} \quad \text{и} \quad c' = \frac{\mu c}{22.4} = c \rho_0$$

где μ — молекулярная масса газа;

ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

Теплоемкости являются функциями термодинамического процесса.

Разность массовых теплоемкостей при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v равна газовой постоянной:

$$c_p - c_v = R$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном

объеме (показатель адиабаты) обозначают буквой k , т. е.

$$K = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}.$$

$$\text{Следовательно, } c = \frac{R}{k-1}; \quad c_p = k c_v$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т.е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной.

Ниже приведены примерные значения мольных теплоемкостей и показателя адиабаты газов.

| Газы | Теплоемкость, кДж/(кмоль·К) | | k |
|----------------------|-----------------------------|-----------|------|
| | μc_v | μc_p | |
| Одноатомные | 12,56 | 20,93 | 1,67 |
| Двухатомные | 20,93 | 29,31 | 1,40 |
| Трех- и многоатомные | 29,31 | 37,68 | 1,29 |

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В прил.1 приведены средние теплоемкости некоторых газов в пределах от 0°C до t . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях проводится интерполяция.

Для смесей идеальных газов

$$\text{массовая теплоемкость } c_{\text{см}} = \sum_1^n m_i c_i,$$

$$\text{объемная теплоемкость } c'_{\text{см}} = \sum_1^n r_i c'_i,$$

$$\text{и мольная теплоемкость } \mu c_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu c_i$$

Для нахождения, например, средней теплоемкости в интервале температур t_1 до t_2 надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость — соответственно в пределах $0^\circ - t_1$ и $0^\circ - t_2$ и по выражению

$$\mu_{\text{см}} = \frac{c_{m2}t_2 - c_{m1}t_1}{t_2 - t_1} \quad \text{определить искомую теплоемкость.}$$

Если в процессе участвуют G кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе $Q = G(cm_2t_2 - cm_1t_1)$.

В $p-v$ - диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение $pvn = \text{const}$, где n — показатель политропы. Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается следующими формулами:

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}$$

Для адиабатного процесса в этих формулах показатель n заменяется показателем $k = c_p/c_v$.

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формуле:

$$u_2 - u_1 = c_v (t_2 - t_1);$$

$$i_2 - i_1 = c_p (t_2 - t_1);$$

$$S_2 - S_1 = c \ln (T_2/T_1);$$

В последнем выражении c — теплоемкость газа в соответствующем процессе. Для политропного процесса

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$$

Удельная работа в политропном процессе, Дж/кг,

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$$

или

$$l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

Для адиабатного процесса: $n = k$, для изобарного процесса: $n = 0$.

В адиабатном процессе удельная работа равна изменению внутренней энергии с обратным знаком:

$$l = -(u_2 - u_1) = c_v (t_2 - t_1)$$

В изотермическом процессе давление изменяется обратно пропорционально объему $p_1/p_2 = V_2/V_1$. Работа в этом процессе равна теплоте:

$$L = Q = GRT \ln V_2/V_1$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе, Дж/кг·К

$$S_2 - S_1 = R \ln v_2/v_1$$

Следует помнить, что

$$T \text{ °K} = t \text{ °C} + 273,15$$

$$dT=dt, \text{ т.е. } \Delta T=\Delta t, \text{ К.}$$

Задача 3

Задачи решаются при помощи *is*-диаграммы водяного пара, практическая часть которой состоит из двух областей. Ниже пограничной кривой сухого насыщенного пара (степень сухости $x = 1$) будет область влажного насыщенного пара ($0 < x < 1$), выше — область перегретого пара. Поэтому, когда в задаче требуется определить состояние пара, то нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В *is*-диаграмме в области влажного пара соответствующие изобара и изотерма совпадают и изображаются одной линией, так как в этой области определенному давлению соответствует определенная температура насыщения. В области перегретого пара изотермы отклоняются от изобар вправо, асимптотически приближаясь к горизонтальной линии.

Удельная внутренняя энергия пара $u = i - pv$ (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т.е. $q = i_2 - i_1$.

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса

$$l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 v_1) - (i_2 - p_2 v_2).$$

Задачи составлены на процессы истечения и дросселирования газов и

паров. Процесс истечения принимается без теплообмена, т.е. адиабатным,

где $v_{кр} = v_1(p_1/p_{кр})^{1/k}$ для газов. Для водяного пара величина $v_{кр}$ может быть определена по is -диаграмме.

В процессе адиабатного дросселирования газа его энтальпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в is -диаграмме, будет параллельна оси s .

Задача 23-274

Вычерчивается цикл $pν$ - и Ts -диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла.

Так как в теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установках процессы сжатия и расширения с понижением давлением являются адиабатными, то основные параметры в точках этих процессов могут быть определены из зависимостей между начальными и конечными параметрами адиабатного процесса (см. указания к задачам 1-2).

В задаче неизвестное значение температуры в соответствующей точке процесса определяется из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД η_t и удельная полезная работа l_o , то удельное количество подведенной теплоты в цикле $q_1 = \eta_t l_o$, а отведенной $q_2 = q_1 - l_o$.

Раздел 2 «Основы теплопередачи»

Задача 2.1

Стенка холодильника, состоящая из наружного слоя изоляционного кирпича толщиной $\delta_1 = 250$ мм и внутреннего слоя совелита толщиной $\delta_2 = 200$ мм, имеет температуру наружной поверхности $t_{1ст}$ и внутренней $t_{3ст}$. Коэффициенты теплопроводности материала слоев соответственно равны: $\lambda_1 = 0,24$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 0,09$ Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока через стенку и температурные градиенты в отдельных слоях. Представить графически распределение температуры по толщине стенки.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $t_{1ст}, ^\circ\text{C}$ | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 |
| $t_{3ст}, ^\circ\text{C}$ | -8 | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | -1 |

Методические указания к решению задачи 1.2.

Для определения плотности теплового потока q , Вт/м² через плоскую стенку и линейной плотности теплового потока q_1 Вт/м через цилиндрическую стенку при известных температурах граничных поверхностей $t_{1ст}$ и t_{n+1}^{cm} используют формулы, полученные на основании закона Фурье

$$q = \frac{t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm}}{\sum_1^n \delta_i \lambda_i} \quad (1)$$

$$q_1 = \frac{2\pi(t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm})}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln(d_{i+1}/d_i)} \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n - число отдельных слоев в стенке;

δ_i - толщина каждого слоя стенки, м;

λ_i - коэффициент теплопроводности каждого слоя, Вт/(м·К).

Задача 2.2

По трубе с внутренним диаметром $d = 50$ мм течет вода со средней скоростью w . Средняя температура воды $t_{ж}$, температура стенки трубы $t_{ст}$ постоянна. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемого в единицу времени тепла (линейную плотность теплового потока, Вт/м), если относительная длина трубы $l/d = 100$.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| w м/сек | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
| $t_{ж}$, °С | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 35 |
| $t_{ст}$, °С | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 |

Методические указания к решению задачи 2.2.

Для нахождения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в задачах рекомендуется воспользоваться формулами определения критериальных чисел. В формулах индекс "ж" указывает, что величины отнесены к определенной температуре $t_{ж}$, т.е. средней температуре жидкости (среды).

Значения коэффициента теплопроводности λ , плотности ρ и коэффициента кинематической вязкости ν конденсата здесь отнесены к средней температуре пленки $t_{cp} = 0,5(t_n + t_{ст})$.

Температура насыщения t_n определяется по заданному давлению пара из таблиц насыщенного водяного пара. Из этих же таблиц находят значение теплоты парообразования.

Задача 2.3

Определить требуемую площадь теплообменной поверхности охладителя наддувочного дизеля на основании следующих данных:

- температура воздуха на входе в охладитель $t'_в = 115^\circ\text{C}$;

- температура воздуха на выходе из охладителя $t''_в = 65^\circ\text{C}$;
- расход воздуха $G_в$;
- температура охлаждающей воды на входе в охладитель t'_w ;
- расход охлаждающей воды $G_w = 1,25 \text{ кг/с}$;
- коэффициент теплопередачи $k = 100 \text{ Вт/(м}^2\text{-К)}$.

Схемы движения теплоносителей:

а) противоточная;

б) прямоточная.

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $G_в, \text{ кг/с}$ | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2 |
| $t'_w, ^\circ\text{C}$ | 38 | 36 | 34 | 32 | 30 | 28 | 26 | 24 | 22 | 22 |

Методические указания к решению задачи 2.3.

Задача связана с тепловым расчетом рекуперативных теплообменников, решаются на основе использования уравнения теплового баланса

Задача 2.4.

Определить плотность теплового потока через плоскую стенку нагревательной печи, состоящую из двух слоев кладки : шамотного кирпича толщиной $\delta_1 = 0,56 \text{ м}$ и диамитового кирпича $\delta_2 = 0,24 \text{ м}$, если температура внутренней поверхности кладки равна $t_{ст1}$, а температура наружного воздуха $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности внутреннего слоя кладки $\lambda_1 = 0,95 \text{ Вт/(м-К)}$, наружного слоя $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт/(м-К)}$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной поверхности $\alpha_k = 8,5 \text{ Вт/(м}^2\text{-К)}$, а ее степень черноты ε .

| Исходные данные | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_{ст1} \text{ } ^\circ\text{C}$ | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 | 1150 | 1200 | 1250 |
| ε | 0,6 | 0,62 | 0,64 | 0,68 | 0,7 | 0,72 | 0,74 | 0,76 | 0,78 | 0,8 |

Методические указания к решению задачи 3.2.

При сложном теплообмене (конвекцией и излучением) в задачах результирующая плотность теплового потока определяется как сумма конвективной и лучистой составляющих:

$$q = \alpha_k(t_{ст} - t_{в}) + \varepsilon C_0 [(0,01t_{ст} + 2,73)^4 - (0,01t_{в} + 2,73)^4],$$

$$\text{где } C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) \text{ -}$$

коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Приложение

Табл.1. Средние объемные теплоемкости газов при $P=\text{const}$ в интервале температур $0=t, ^\circ\text{C}$, Дж/(м³К).

| $t, ^\circ\text{C}$ | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ O | Воздух |
|---------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|--------|
| 0 | 1,600 | 1,299 | 1,306 | 1,494 | 1,297 |
| 100 | 1,700 | 1,300 | 1,318 | 1,505 | 1,300 |
| 200 | 1,737 | 1,304 | 1,335 | 1,522 | 1,307 |
| 300 | 1,863 | 1,311 | 1,356 | 1,542 | 1,317 |
| 400 | 1,930 | 1,321 | 1,387 | 1,565 | 1,329 |
| 500 | 1,989 | 1,332 | 1,398 | 1,590 | 1,343 |
| 600 | 2,041 | 1,345 | 1,417 | 1,615 | 1,456 |
| 700 | 2,088 | 1,359 | 1,434 | 1,641 | 1,371 |
| 800 | 2,131 | 1,372 | 1,450 | 1,668 | 1,384 |
| 900 | 2,169 | 1,385 | 1,465 | 1,696 | 1,398 |
| 1000 | 2,204 | 1,397 | 1,478 | 1,723 | 1,410 |
| 1100 | 2,235 | 1,409 | 1,489 | 1,750 | 1,421 |
| 1200 | 2,264 | 1,420 | 1,501 | 1,777 | 1,433 |
| 1300 | 2,290 | 1,431 | 1,511 | 1,803 | 1,443 |
| 1400 | 2,314 | 1,441 | 1,520 | 1,828 | 1,453 |
| 1500 | 2,335 | 1,450 | 1,529 | 1,853 | 1,462 |
| 1600 | 2,356 | 1,459 | 1,538 | 1,876 | 1,471 |
| 1700 | 2,374 | 1,467 | 1,546 | 1,900 | 1,479 |
| 1800 | 2,392 | 1,475 | 1,554 | 1,921 | 1,487 |
| 1900 | 2,407 | 1,482 | 1,562 | 1,942 | 1,494 |
| 2000 | 2,422 | 1,489 | 1,569 | 1,963 | 1,501 |

Табл.2. Термодинамические свойства воды и водяного пара
в состоянии насыщения (аргумент-давление)

| p , МПа | t , °С | v' , м ³ /кг | v'' , м ³ /кг | i' , кДж/кг | i'' , кДж/кг | r , кДж/кг | S' , кДж/(кг· К) | S'' , кДж/(кг· К) |
|--------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,003 | 24,1 | 0,00100 | 45,67 | 101,0 | 2545 | 2444 | 0,354 | 8,578 |
| 0,004 | 28,98 | 0,00100 | 34,80 | 121,4 | 2554 | 2433 | 0,422 | 8,475 |
| 0,005 | 32,90 | 0,00101 | 28,19 | 137,8 | 2561 | 2423 | 0,476 | 8,395 |
| 0,10 | 99,63 | 0,00104 | 1,694 | 417,5 | 2676 | 2258 | 1,303 | 7,361 |
| 0,12 | 104,8 | 0,00105 | 1,429 | 439,4 | 2684 | 2244 | 1,361 | 7,299 |
| 0,14 | 109,3 | 0,00105 | 1,237 | 458,4 | 2691 | 2232 | 1,411 | 7,248 |
| 0,16 | 113,3 | 0,00105 | 1,092 | 475,4 | 2697 | 2221 | 1,455 | 7,203 |
| 0,18 | 116,9 | 0,00106 | 0,978 | 490,7 | 2702 | 2211 | 1,494 | 7,164 |
| 0,20 | 120,3 | 0,00106 | 0,886 | 504,7 | 2707 | 2202 | 1,530 | 7,128 |
| 0,40 | 143,6 | 0,00108 | 0,462 | 604,7 | 2738 | 2143 | 1,776 | 6,897 |
| 0,60 | 158,8 | 0,00110 | 0,315 | 670,4 | 2756 | 2086 | 2,931 | 6,760 |
| 0,80 | 170,4 | 0,00112 | 0,240 | 720,9 | 2768 | 2047 | 2,046 | 6,662 |
| 1,0 | 179,9 | 0,00113 | 0,194 | 762,6 | 2777 | 2014 | 2,138 | 6,585 |
| 1,2 | 187,9 | 0,00114 | 0,163 | 798,4 | 2783 | 1985 | 2,216 | 6,521 |
| 1,4 | 195,0 | 0,00115 | 0,141 | 830,1 | 2788 | 1958 | 2,284 | 6,466 |
| 1,6 | 201,4 | 0,00116 | 0,1237 | 858,6 | 2792 | 1934 | 2,344 | 6,419 |
| 1,8 | 207,1 | 0,00117 | 0,1103 | 884,6 | 2795 | 1910 | 2,398 | 6,376 |
| 2,0 | 212,4 | 0,00118 | 0,0995 | 908,6 | 2797 | 1889 | 2,446 | 6,337 |
| 2,2 | 217,2 | 0,00119 | 0,0906 | 930,9 | 2799 | 1868 | 2,492 | 6,302 |
| 2,4 | 221,8 | 0,00119 | 0,0832 | 951,9 | 2800 | 1848 | 2,533 | 6,269 |
| 2,6 | 226,0 | 0,00120 | 0,0769 | 971,7 | 2801 | 1829 | 2,574 | 6,239 |
| 2,8 | 230,0 | 0,00121 | 0,0714 | 990,5 | 2802 | 1811 | 2,611 | 6,210 |
| 3,0 | 233,8 | 0,00122 | 0,0666 | 1008,4 | 2802 | 1793 | 2,646 | 6,183 |
| 3,5 | 242,5 | 0,00123 | 0,0570 | 1049,8 | 2801 | 1751 | 2,725 | 6,122 |
| 4,0 | 250,3 | 0,00125 | 0,0494 | 1087,5 | 2799 | 1712 | 2,797 | 6,067 |
| 4,5 | 257,4 | 0,00127 | 0,0440 | 1122,2 | 2796 | 1674 | 2,861 | 6,017 |
| 5,0 | 263,9 | 0,00129 | 0,0394 | 1154,6 | 2793 | 1638 | 2,924 | 5,971 |

Табл.3. Физические свойства сухого воздуха при давлении 760 мм рт.ст.

| t, °C | ρ , кг/м ³ | c_{cp} , кДж/(кгК) | $\lambda 10^2$, Вт/(мК) | $a 10^6$, м ² /с | $\mu 10^6$, (Nс)/м ² | $\gamma 10^6$, м ² /с | Pr |
|----------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------|
| -20 | 1,395 | 1,009 | 2,28 | 16,2 | 16,2 | 11,61 | 0,716 |
| -10 | 1,342 | 1,009 | 2,36 | 17,4 | 16,7 | 12,43 | 0,712 |
| 0 | 1,293 | 1,005 | 2,44 | 18,8 | 17,2 | 13,28 | 0,707 |
| 10 | 1,247 | 1,005 | 2,51 | 20,0 | 17,6 | 14,16 | 0,705 |
| 20 | 1,205 | 1,005 | 2,59 | 21,4 | 18,1 | 15,06 | 0,703 |
| 30 | 1,165 | 1,005 | 2,67 | 22,9 | 18,6 | 16,00 | 0,701 |
| 40 | 1,128 | 1,005 | 2,76 | 24,3 | 19,1 | 16,96 | 0,699 |
| 50 | 1,093 | 1,005 | 2,83 | 25,7 | 19,6 | 17,95 | 0,698 |
| 60 | 1,060 | 1,005 | 2,90 | 27,2 | 20,1 | 18,97 | 0,696 |
| 70 | 1,029 | 1,009 | 2,96 | 28,6 | 20,6 | 20,02 | 0,694 |
| 80 | 1,000 | 1,009 | 3,05 | 30,2 | 21,1 | 21,09 | 0,692 |
| 90 | 0,972 | 1,009 | 3,13 | 31,9 | 21,5 | 22,10 | 0,690 |
| 100 | 0,946 | 1,009 | 3,21 | 33,6 | 21,9 | 23,13 | 0,688 |
| 120 | 0,898 | 1,009 | 3,34 | 36,8 | 22,8 | 25,45 | 0,686 |
| 140 | 0,854 | 1,013 | 3,49 | 40,3 | 23,7 | 27,80 | 0,684 |
| 160 | 0,815 | 1,017 | 3,64 | 43,9 | 24,5 | 30,09 | 0,682 |
| 180 | 0,779 | 1,022 | 3,78 | 47,5 | 25,3 | 32,49 | 0,681 |
| 200 | 0,746 | 1,026 | 3,93 | 51,4 | 26,0 | 34,85 | 0,680 |

Табл.4.Физические свойства воды на линии насыщения

| t, °C | $\rho \cdot 10^{-5}$, Па | ρ , кг/м ³ | I, кДж/кг | c_p , кДж/(кгК) | λ , Вт/(мК) | $a \cdot 10^6$, м ² /с | $\mu \cdot 10^6$, (Нс)/м ² | $\nu \cdot 10^6$, м ² /с | Pr |
|----------|------------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------|---|---|-------|
| 0 | 1,013 | 999,9 | 0 | 4,212 | 0,560 | 13,2 | 1788 | 1,789 | 13,5 |
| 10 | 1,013 | 999,7 | 42,04 | 4,191 | 0,580 | 13,8 | 1306 | 1,306 | 9,45 |
| 20 | 1,013 | 998,2 | 83,91 | 4,183 | 0,597 | 14,3 | 1004 | 1,006 | 7,03 |
| 30 | 1,013 | 995,7 | 125,7 | 4,174 | 0,612 | 14,7 | 801,5 | 0,805 | 5,45 |
| 40 | 1,013 | 992,2 | 167,5 | 4,174 | 0,627 | 15,1 | 653,3 | 0,659 | 4,36 |
| 50 | 1,013 | 988,1 | 209,3 | 4,174 | 0,640 | 15,5 | 549,4 | 0,556 | 3,59 |
| 60 | 1,013 | 983,1 | 251,1 | 4,179 | 0,650 | 15,8 | 469,9 | 0,478 | 3,03 |
| 70 | 1,013 | 977,8 | 293,0 | 4,187 | 0,662 | 16,1 | 406,1 | 0,415 | 2,58 |
| 80 | 1,013 | 971,8 | 335,0 | 4,195 | 0,669 | 16,3 | 355,1 | 0,365 | 2,23 |
| 90 | 1,013 | 965,3 | 377,0 | 4,203 | 0,676 | 16,5 | 314,9 | 0,326 | 1,97 |
| 100 | 1,013 | 958,4 | 419,1 | 4,220 | 0,684 | 16,8 | 282,5 | 0,295 | 1,75 |
| 120 | 1,98 | 943,1 | 503,7 | 4,250 | 0,686 | 17,1 | 237,4 | 0,252 | 1,47 |
| 140 | 3,61 | 926,1 | 589,1 | 4,287 | 0,685 | 17,2 | 201,4 | 0,217 | 1,26 |
| 160 | 6,18 | 907,4 | 657,4 | 4,346 | 0,681 | 17,8 | 173,6 | 0,191 | 1,10 |
| 180 | 10,03 | 886,9 | 763,3 | 4,417 | 0,672 | 17,2 | 153,0 | 0,173 | 1,03 |
| 200 | 15,55 | 863,0 | 852,5 | 4,505 | 0,658 | 17,0 | 136,4 | 0,158 | 0,932 |
| 220 | 23,20 | 840,3 | 943,7 | 4,614 | 0,640 | 16,5 | 124,6 | 0,148 | 0,898 |
| 240 | 33,48 | 813,6 | 1037,5 | 4,760 | 0,617 | 16,0 | 114,8 | 0,141 | 0,883 |
| 260 | 46,94 | 784,0 | 1135,7 | 4,980 | 0,593 | 15,2 | 105,9 | 0,135 | 0,892 |
| 280 | 64,19 | 750,7 | 1236,7 | 5,300 | 0,565 | 14,3 | 98,1 | 0,131 | 0,917 |
| 300 | 85,92 | 712,5 | 1344,9 | 5,760 | 0,532 | 13,0 | 91,2 | 0,128 | 0,986 |