



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Н.Ю. Свечникова
С.В. Юдина
А.В.Горохов

**ПРАКТИКУМ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ
И ТЕПЛОТЕХНИКЕ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума*

Магнитогорск
2018

Рецензенты:

кандидат технических наук,
ведущий специалист НТЦ ГАДП,
ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
Е.Н.Степанов

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологий металлургии и литейных процессов,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
М.В.Потапова

Свечникова Н.Ю., Юдина С.В., Горохов А.В.

Практикум по технической термодинамике и теплотехнике [Электронный ресурс]: практикум / Наталья Юрьевна Свечникова, Светлана Владимировна Юдина, Алексей Вячеславович Горохов; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,20 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Практикум предназначен для выполнения лабораторных и практических работ по дисциплинам «Техническая термодинамика и теплотехника», «Техническая термодинамика и энерготехнология». Включает теоретические основы дисциплины, 3 лабораторные работы, контрольные тесты и многовариантное домашнее расчетное задание.

Практикум предназначен для обучающихся всех форм обучения по направлениям подготовки 18.03.01 «Химическая технология», 27.03.01 «Стандартизация и метрология» и другим программам, включающим дисциплины «Техническая термодинамика и теплотехника», «Техническая термодинамика и энерготехнология».

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.....	5
1.1. Основные термодинамические процессы в газах и парах	5
1.2. Термодинамические циклы теплосиловых установок. Теоретические основы процессов получения холода	11
1.3. Основы теплопередачи. Способы переноса тепла	14
2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	19
2.1. Лабораторная работа №1 Определение коэффициента политропы в процессе сжатия газа в компрессоре	19
2.2. Лабораторная работа №2 Определение холодильного коэффициента паровой компрессионной холодильной установки.....	26
2.3. Лабораторная работа №3 Определение тепловых потоков в процессе теплопередачи	31
КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ.....	40
ДОМАШНЕЕ РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ «РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ»	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ	68

ВВЕДЕНИЕ

Практикум предназначен для бакалавров всех направлений, изучающих дисциплины «Техническая термодинамика и теплотехника», «Техническая термодинамика и энерготехнология» и «Техническая термодинамика». Согласно рабочим программам данные дисциплины включают разделы:

1. Основные понятия и исходные положения термодинамики.
2. Первый закон термодинамики.
3. Второй закон термодинамики.
4. Основные термодинамические процессы в газах и парах.
5. Термодинамические циклы теплосиловых установок.
6. Основы теплопередачи. Способы переноса тепла.
7. Топливо: его теплотехнические характеристики и сжигание.
8. Вторичные энергоресурсы.

В связи с уменьшением количества часов на изложение данных дисциплин целесообразно применять электронный курс, который обладает значительными возможностями в организации самостоятельной работы студентов. Такой курс создается для приобретения и закрепления знаний путем структурирования теоретического и практического материала, который обеспечивает возможность оперативного контроля и самоконтроля студентов с помощью контрольных вопросов, приведенных в конце каждой лабораторной работы. В результате бакалавр обеспечивается не только необходимым теоретическим и практическим материалом, но и алгоритмом самостоятельного освоения учебной темы, компонентами организации самоконтроля.

В конце практикума имеются приложения со справочным материалом для расчета и библиографический список, которые могут быть использованы при подготовке к защите лабораторных работ и экзамену.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1. Основные термодинамические процессы в газах и парах

Первый закон термодинамики устанавливает взаимосвязь между количеством теплоты, внутренней энергией и работой [1-10].

К основным термодинамическим процессам относятся: *изохорный, изотермический, изобарный и адиабатный*. Для всех этих процессов устанавливается общий метод исследования, который заключается в следующем:

-выводится уравнение процесса кривой в PV- и TS – диаграммах;

-выводится зависимость между основными параметрами рабочего тела в начале и конце процесса;

- определяется изменение внутренней энергии по формуле, справедливой для всех процессов идеального газа:

-вычисляется работа:

$$I = p \cdot (V_2 - V_1), (1.1)$$

-определяется количество теплоты, участвующее в процессе:

$$Q = c \cdot (t_2 - t_1), (1.2)$$

-определяется изменение энтальпии по формуле, справедливой для всех процессов идеального газа:

$$\Delta H = H_2 - H_1 (1.3)$$

или при постоянной теплоемкости:

$$\Delta H = c_p \cdot (t_2 - t_1) (1.4)$$

-определяется изменение энтропии:

$$\Delta S = c_v \cdot \ln(T_2 / T_1) + R \cdot \ln(v_2 / v_1), (1.5)$$

$$\Delta S = c_p \cdot \ln(T_2 / T_1) - R \cdot \ln(P_2 / P_1), (1.6)$$

$$\Delta S = c_v \cdot \ln(T_2 / T_1) + c_p \cdot \ln(v_2 / v_1), (1.7)$$

Все процессы рассматриваются как обратимые.

1.1.1. Изопроцессы идеальных газов

1) Изохорный процесс

$$V = \text{const } V_2 = V_1 \quad (1.8)$$

Уравнение состояния процесса:

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1 \quad (1.9)$$

Так как $v_2 = v_1$, то $l = 0$ и уравнение 1-го закона термодинамики имеет вид:

$$q = \Delta u = c_v * (t_2 - t_1) \quad (1.10)$$

Схема процесса:

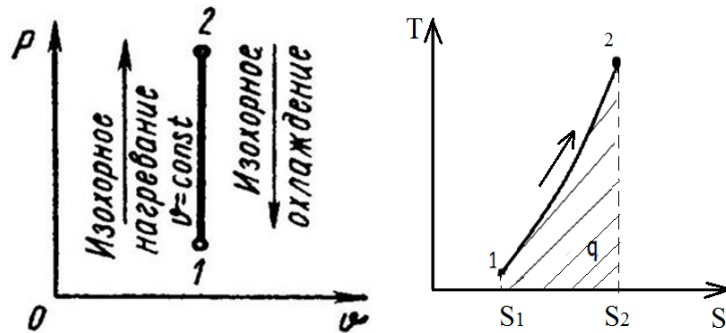


Рис.1.1. Изохорный процесс

2) Изобарный процесс

$$P = \text{const}, P_2 = P_1 \quad (1.11)$$

Уравнение состояния процесса:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (1.12)$$

Работа этого процесса:

$$l = P * (V_2 - V_1) \quad (1.13)$$

Уравнение 1-го закона термодинамики имеет вид:

$$q = \Delta u + l = C_p * (t_2 - t_1) \quad (1.14)$$

Схема процесса:

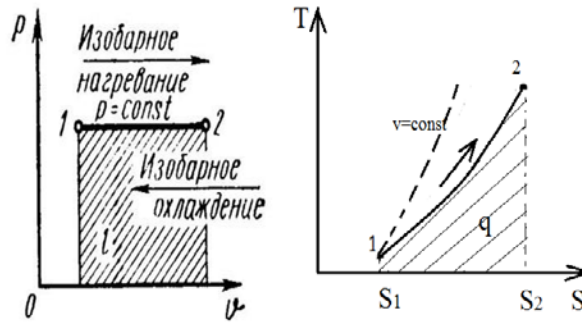


Рис.1.2. Изобарный процесс

3) Изотермический процесс

$$T = const, \quad T_2 = T_1 \quad (1.15)$$

Уравнение состояния:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (1.16)$$

Так как $T_2 = T_1$, то $\Delta u = 0$ и уравнение 1-го закона термодинамики будет иметь вид:

$$q = l = R * T * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (1.17)$$

$$q = l = R * T * \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1.18)$$

где R – газовая постоянная [Дж/(кг·К)].

Схема процесса:

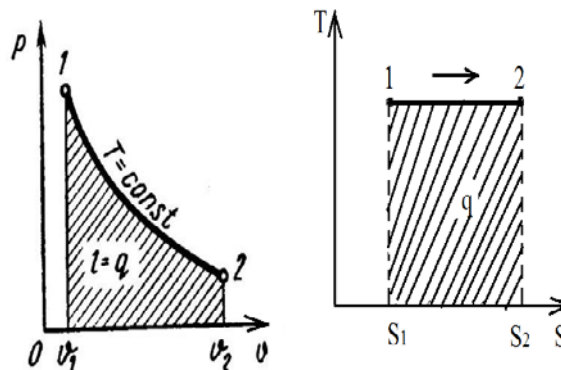


Рис.1.3. Изотермический процесс

4) Адиабатный процесс

В данном процессе не подводится и не отводится тепло, т.е. $q=0$.
Уравнение состояния:

$$P * V^k = const(1.19)$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты. Уравнение 1-го закона термодинамики будет иметь вид:

$$l = -\Delta_u = -c_v * (t_1 * t_2)(1.20)$$

Схема процесса:

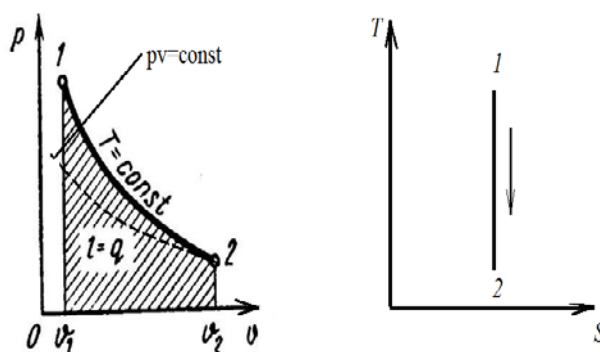


Рис.1.4. Адиабатный процесс

1.1.2. Политронные процессы

Так как основным процессом при сжатии газов является политропный процесс, рассмотрим его подробнее. Уравнение этого процесса:

$$p * v^n = const, (1.24)$$

где n - показатель политропы.

Если какой-то параметр состояния при взаимодействии с внешней средой фиксировать, то процесс, входящий в гамму политропных, называют частным:

а) $p * v^n = const, up = const \rightarrow n = 0$ — **изобарный**,

а для идеального газа $V_2 / V_1 = T_2 / T_1$,

б) $p * v^n = const, iv = const \rightarrow n = \pm\infty$ — **изохорный**,

а для идеального газа $P_2 / P_1 = T_2 / T_1$.

в) $p \cdot v^n = const$, и $T = const$ – изотермический,

а для идеального газа $n = 1$ и $P_1/P_2 = V_2/V_1$.

г) $p \cdot v^k = const$, и $s = const \rightarrow n = k = \frac{c_p}{c_v}$ – изоэнтروпийный

(адиабатный).

На рис.1.5 представлены графики политроп с различными показателями n для частных процессов, только еще раз напомним, что величина показателя адиабаты для двухатомных газов $k \approx 1,4$.

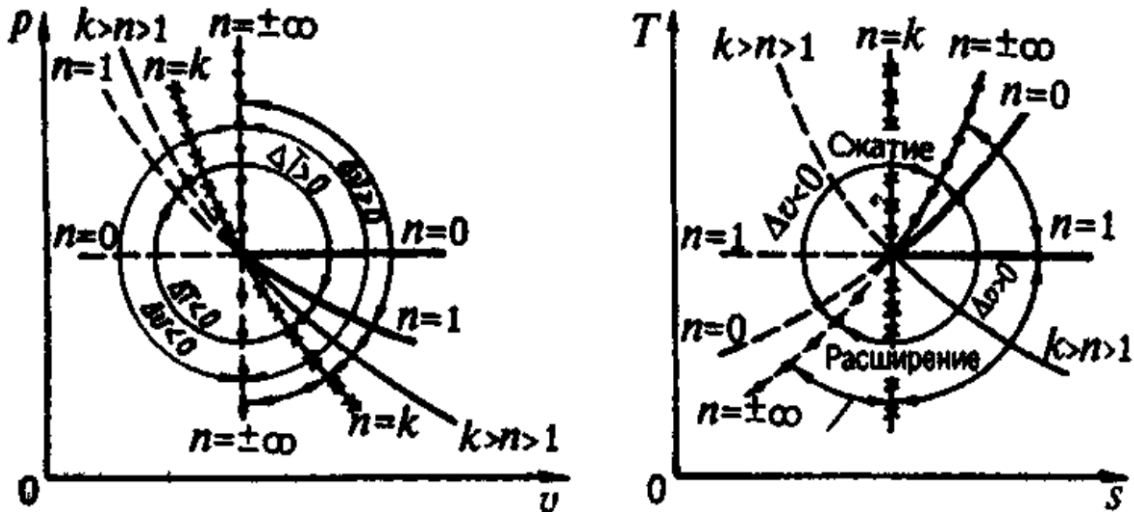


Рис. 1.5. Взаимное расположение частных политропных процессов в осях $p - v$ и $T - s$ при различных значениях показателей политропы n

Все политропные процессы можно разделить на три группы в зависимости от величины показателя политропы, каждая группа характеризуется определенным видом процессов энергетического превращения.

Первая группа: процессы, для них $-\infty < n < 1$. Кривые, этих процессов, расположены между изохорой и изотермой. В процессах политропного сжатия, относящихся к первой группе, газ передает в окружающую среду всю энергию, подводимую к нему в форме работы, а, кроме того, часть своей внутренней энергии.

Вторая группа процессы, для них $1 < n < k$. Кривые, этих процессов расположены между изотермой и адиабатой. В процессах второй группы энергия, подводимая к газу в форме работы, частично затрачивается на повышение внутренней энергии газа, а частично передается окружающей среде в форме теплоты. Такие процессы характерны для работы компрессоров.

Третья группа процессы для них $k < n < +\infty$. Кривые этих процессов расположены между адиабатой и изохорой.

В процессах третьей группы сжатию подвергается холодный газ, получающий из окружающей среды энергию, как в форме теплоты, так и в

форме работы. Примером такого сжатия такого является двигатель внутреннего сгорания и газовые турбины.

На рисунке 1.5 представлены три группы политропных процессов в координатах $p - V$ и $T - S$. На диаграмме $p - V$ справа от ($n = \pm \infty$) расположены кривые, соответствующие процессам расширения ($l > 0$), а слева - процессам сжатия ($l < 0$). На диаграмме $T - S$ справа от адиабаты ($n = k$) лежат кривые, изображающие процессы с подводом теплоты ($q > 0$) слева - с отводом ($q < 0$).

Политропные процессы широко используют для описания реальных термодинамических процессов, происходящих в промышленных аппаратах.

При исследовании термодинамического процесса определяют величину показателя политропы. Если известно начальное и конечное состояние рассматриваемого процесса, показатель политропы определяют: записывают уравнение политропы: $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$, логарифмируют это равенство:

$$\log p_1 + n \log v_1 = \log p_2 + n \log v_2 \quad (1.25)$$

Из этого выражения определяют

$$n = \frac{\log \left(\frac{p_1}{p_2} \right)}{\log \left(\frac{v_1}{v_2} \right)} \quad (1.26)$$

Работа в политропном процессе может быть определена из общего выражения

$$l = \int \frac{dp}{dv} = \frac{1}{(n-1) * (p_1 v_1 - p_2 v_2)} \quad (1.27)$$

Из выражения (1.27) найдем

$$l_m = p_2 v_2 + \frac{1}{(n-1) * (p_2 v_2 - p_1 v_1) - p_1 v_1} \quad (1.28)$$

После преобразования:

$$l_m = \frac{n}{(n-1) * (p_2 v_2 - p_1 v_1)} \quad (1.29)$$

Для дальнейшего анализа политропного процесса необходимо знать связь не только между давлением и удельным объемом, выражаемую уравнением политропы $p v^n = \text{const}$, но и между температурой и удельным объемом, а также температурой и давлением. Эти связи находятся из соответствующих уравнений политропного процесса: $T v^{(n-1)} = \text{const}$ и $T p^{\frac{1}{n-1}} = \text{const}$.

Связь между температурой и удельным объемом в процессе политропного сжатия будет:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{(n-1)} \quad (1.30)$$

Связь между температурой и давлением в процессе политропного сжатия будет:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (1.31)$$

Из выражения (11) можно определить температуру в конце процесса сжатия:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (1.32)$$

1.2. Термодинамические циклы теплосиловых установок. Теоретические основы процессов получения холода

Согласно второму началу термодинамики, перенос теплоты от «холодного» к «горячему» телу самопроизвольно не происходит, требуя затрат работы. В термодинамических процессах подвод или отвод теплоты q описывается через изменение энтропии ΔS системы: $\Delta q = T\Delta S$, где T - температура. Отсюда следует, что при подводе к телу теплоты его энтропия возрастает, а при отводе теплоты - уменьшается.

В непрерывных холодильных процессах хладагент должен принять теплоту от охлаждаемого тела на нижнем температурном уровне, отдать теплоту на верхнем уровне теплоприемнику и вернуться в исходное состояние. Поэтому в установившемся процессе суммарная энтропия хладагента не изменяется ($\Delta S=0$).

Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{(q_1 - q_2)} = \frac{q_2}{q_{ц}} \quad (1.33)$$

где q_2 – тепло, отнятое у холодного источника теплоты, Дж;

q_1 – тепло, переданное горячему источнику теплоты, Дж;

$q_{ц}$ – полезное тепло цикла холодильной установки, Дж.

Эффективность холодильных установок зависит также от свойств хладагентов, к которым предъявляется ряд требований:

1) давление насыщенного пара хладагента, соответствующее требуемым низким температурам, должно быть выше атмосферного, т.к. при этом легче бороться с утечкой хладагента, чем с подсосом воздуха при вакууме.

Попадающий в хладагент воздух сильно ухудшает теплопередачу и содержит влагу, которая может замерзнуть при низкой температуре;

2) теплота парообразования r должна быть по возможности больше, т.к. при одном и том же расходе хладагента она определяет хладопроизводительность установки;

3) хладагенты не должны вредно воздействовать на здоровье человека и не должны обладать коррозирующими свойствами.

Наиболее распространенным хладагентом является аммиак ($t_s = -33,5^\circ\text{C}$), позволяющий получить достаточно высокий холодильный коэффициент и относительно невысокое давление в цикле. Однако из-за токсичности аммиака в последнее время широко применяют фреоны (в частности, фреон – 12). По термодинамическим свойствам фреон – 12 ближе к аммиаку, хотя меньшая его теплота парообразования обуславливает большой расход хладагента.

Паровые компрессионные установки, позволяют в области насыщенного пара приблизить холодильный цикл к обратному циклу Карно (рис. 1.6).

Насыщенный пар низкокипящей жидкости (хладагента) всасывается компрессором и адиабатно сжимается до давления конденсации p_2 с затратой работы l_0 (процесс 1 – 2). В точке 2 имеем перегретый пар. После компрессора сжатый перегретый пар поступает в конденсатор, где при постоянном давлении p_2 вследствие отнятия у пара теплоты q_1 охлаждающей водой (процесс 2 – 2' - 3) он превращается в кипящий жидкий хладагент.

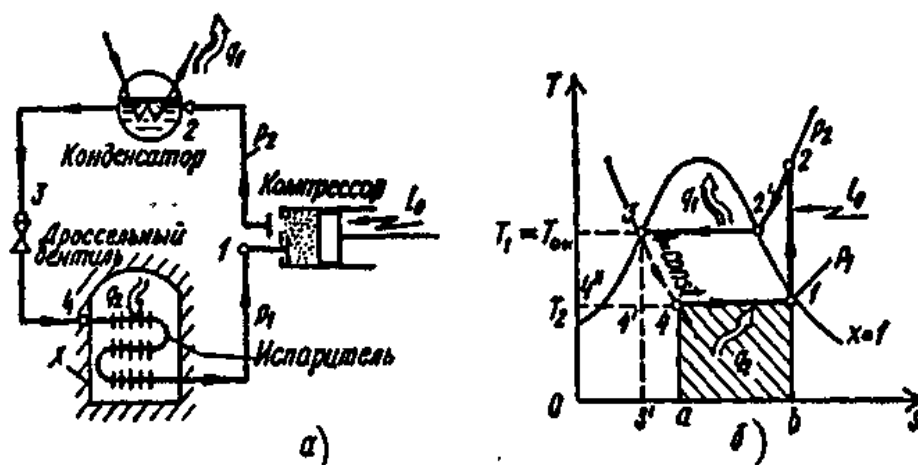


Рис. 1.6 Схема (а) и цикл (б) паровой компрессионной холодильной установки

Причем сначала изобарно снижается температура перегретого пара по линии 2 – 2' до состояния сухого насыщенного пара, а затем в изобарно – изотермическом процессе через область влажного насыщенного пара он превращается по линии 2' - 3 в кипящий жидкий хладагент. Для дальнейшего снижения температуры хладагента можно было бы применить детандер (расширительный цилиндр) и осуществить в нём адиабатное расширение по линии 3 – 4' с производством внешней работы за счет убыли внутренней энергии. Однако для упрощения установки, уменьшения её стоимости и

обеспечения гибкой регулировки детандер заменяют регулирующим дроссельным вентилем, в котором хладагент после конденсатора дросселируется с понижением давления и температуры в политропном необратимом процессе 3 – 4 при $h = \text{const}$. При этом сухость влажного насыщенного пара в точке 4 ниже, чем влажного насыщенного пара в точке 4'. После дроссельного вентиля образовавшийся влажный насыщенный пар с низкой температурой T_2 поступает по трубам в испаритель, находящийся в холодильной камере. В испарителе в изобарно – изотермическом процессе при T_2 и p_1 происходит отбор теплоты q_2 от охлаждаемых объектов и за счет этого испарение хладагента в сухой насыщенный пар процесс 4 – 1. Образовавшийся сухой насыщенный пар (точка 1) вновь засасывается компрессором, и цикл повторяется.

Удельная холодопроизводительность:

$$q_2 = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (1.34)$$

Энтальпия хладагента до и после дросселирования не изменяется $h_3 = h_4$. Хотя замена детандера дроссельным вентилем упрощает конструкцию установки и удешевляет её, процесс дросселирования является необратимым, снижает холодопроизводительность установки на величину площади 4 – 4' - 3' - а, а также её эффективность. Количество теплоты, переданной в конденсаторе охлаждающей среде:

$$q_1 = h_2 - h_3 \quad (1.35)$$

Тогда холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_2 - h_1)} \quad (1.36)$$

Отсюда следует, что ε увеличивается с повышением температуры в испарителе T_2 , (чем выше расположена линия 4 – 1, тем больше холодопроизводительность) и понижением температуры окружающей среды в конденсаторе T_1 (линия 2' - 2 расположена ниже, затрачиваемая работа в компрессоре меньше).

Затрата работы в компрессоре при адиабатном сжатии 1 – 2: $l_0 = h_2 - h_1$. Процесс 3 – 4 совершается без внешней работы и на оценку работы цикла не влияет.

Реальный цикл парокompрессионной холодильной установки отличается от теоретического тем, что из-за трения сжатие в компрессоре происходит не по адиабате, а по политропе. Кроме того, теплообмен происходит при конечной разности температур, в результате чего увеличивается затраты работы на сжатие, а действительный холодильный коэффициент оказывается меньше теоретического.

1.3. Основы теплопередачи. Способы переноса тепла

Теплопередача изучает законы и способы переноса тепла. Согласно второму закону термодинамики самопроизвольный перенос тепла происходит от тел с большей температурой к телам с меньшей температурой. Под полным тепловым потоком понимают количество теплоты, проходящее в единицу времени через поверхность величиной F :

$$Q = q * F, \text{ Вт} \quad (1.37)$$

где q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Различают два характерных случая температурного состояния тела:

1. В каждой точке тела температура остаётся неизменной во времени, что математически означает, что $t = \text{const}$ или $\partial t / \partial \tau = 0$. При этом температура является функцией пространственных координат $t = f(x, y, z)$.

Температурное состояние тела, неизменное во времени, называется стационарным или установившимся. При таком состоянии тела приход тепла равен его расходу.

2. При нагревании или охлаждении тела температура в каждой точке его непрерывно изменяется во времени. Такое температурное состояние тела, при котором температура является функцией и координат и времени, называется нестационарным или неустойчивым. Математически это выражается так $t = f(x, y, z, \tau)$.

Температурное состояние тела в обоих случаях характеризуется дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при одномерном тепловом потоке имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a * \partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1.38)$$

где $\partial t / \partial \tau$ – скорость изменения температуры, град/с;

$a = \lambda_c / (c * \rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

x – текущая координата, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт}/(\text{м} * \text{К})$;

c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг} * \text{К})$;

ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Так как при стационарном режиме $\partial t / \partial \tau = 0$, то уравнение (1.38) будет иметь следующий вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (1.39)$$

Уравнение (1.39) – это дифференциальное уравнение теплопроводности при стационарном тепловом режиме для одномерного (по оси x) теплового потока. Дважды интегрируя это уравнение, получаем последовательно

$$\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 (1.40)$$

$$t = C_1 * x + C_2 (1.41)$$

Из уравнения (1.41) следует, что при $\lambda = \text{const}$ распределение температуры по толщине стенки при стационарном тепловом режиме происходит по прямой линии. Уравнение (1.41) – это общее решение уравнения (1.39). Если задать температуры внутренней и наружной поверхности (частный случай граничных условий 1 рода), то можно найти значения постоянных C_1 и C_2 .

При $x = 0$, $t = t_{\text{вн}}$. Тогда из уравнения (1.40) находим, что $C_2 = t_{\text{вн}}$.

При $x = S$, $t = t_{\text{н}}$, тогда по уравнению (1.40) $t_{\text{н}} = C_1 * S + t_{\text{вн}}$.

Отсюда $C_1 = - (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})/S$,

где $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{н}}$ – соответственно температуры внутренней и наружной поверхности, $^{\circ}\text{C}$;

S – толщина стенки, м.

После подстановки в уравнение (1.41) оно будет иметь следующий вид

$$t = t_{\text{вн}} - \left((t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) * \frac{x}{S} \right) (1.42)$$

Уравнение (1.42) является частным решением уравнения (1.41) и позволяет определить температуру в любой точке по толщине кладки при стационарном режиме. Стационарное тепловое состояние характеризуется также постоянством количества теплоты, проходящей через наружные стены, например, коксовых печей.

При нестационарном тепловом режиме работает кладка внутренних частей коксовой батареи (вертикалы, стены коксовых камер и т.д.).

Для определения плотности теплового потока $q = Q/F$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$), проходящего через плоскую стенку площадью F (м^2) путём теплопроводности, используется уравнение Фурье

$$q = -\lambda * \frac{\partial t}{\partial x} (1.43)$$

С учетом уравнения (1.43) напомним, что $\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 = - \left(\frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{S} \right)$.

Тогда

$$q = \frac{\lambda}{S * (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})} (1.44)$$

От наружной поверхности кладки теплота обычно передаётся в окружающую среду путём:

1. Конвекции свободной или вынужденной;
2. Тепловой радиацией.

Свободная конвекция происходит при скорости движения воздуха W менее 5 м/с. Механизм свободной конвекции связан с тем, что воздух нагреваясь, становится менее плотным и поднимается вверх, а на место ему приходит более плотный холодный воздух. Т.е. движущей силой свободной конвекции является разность плотностей холодного и теплого воздуха в поле действия гравитационных сил.

Передача тепла конвекцией описывается уравнение Ньютона-Рихмана (закон конвекции)

$$q_k = \alpha * (t_n - t_{окр})(1.45)$$

где t_n и $t_{окр}$ – соответственно температуры наружной поверхности кладки и окружающей среды, °С;

α – коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной стенки к воздуху, который характеризует интенсивность передачи тепла конвекцией, Вт/(м²*К).

Коэффициент теплоотдачи α зависит от физических свойств воздуха (коэффициента теплопроводности λ , кинематической вязкости ν , удельной теплоёмкости c , коэффициента объёмного расширения β), от размера поверхности, от разности температур стенки и окружающего воздуха Δt .

Для случая свободной конвекции результаты опыта представляют в виде критериальной зависимости М.А.Михеева

$$Nu = C * (Gr * Pr)^n(1.46)$$

где Nu – критерий Нуссельта, выражающий теплообмен на границе раздела воздух – пограничный слой, или отношение внутреннего теплового сопротивления пограничного слоя к внешнему тепловому сопротивлению воздуха передаче тепла конвекцией:

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda_r}(1.47)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²*К;

λ_r – коэффициент теплопроводности воздуха в пограничном слое при температуре t_r пограничного слоя, Вт/м*К.

Температура пограничного слоя на границе раздела воздух – стенка определяется по уравнению

$$t_r = 0,5 * (t_n + t_{окр})(1.48)$$

Критерий Грасгофа, выражающий отношение подъемной силы, обусловленной разностью температур наружной поверхности стенки и окружающего воздуха к силам вязкости на границе раздела определяется по отношению

$$Gr = \frac{g \cdot d_{\text{ЭКВ}}^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_{\Gamma}^2} \quad (1.49)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$d_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр, м ;

β – коэффициент объёмного расширения воздуха, град.^{-1} ;

$\Delta t = (t_{\text{н}} - t_{\text{окр}})$ – разность температур между наружной поверхностью стенки и окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

ν_{Γ} – коэффициент кинематической вязкости воздуха на границе раздела при температуре t_{Γ} , $\text{м}^2/\text{с}$.

Эквивалентный диаметр определяется по выражению

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot S}{\Pi} \quad (1.50)$$

где S – площадь охлаждаемой стенки, м^2 ;

Π – периметр охлаждаемой стенки, м .

Критерий Прандтля, выражающий отношение инерционных сил гидродинамических к тепловым определяется из выражения

$$Pr = \frac{c_{\Gamma} \cdot \nu_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \quad (1.51)$$

где c_{Γ} – удельная теплоёмкость воздуха при температуре t_{Γ} , $\text{Дж/м}^3 \cdot \text{К}$;

ρ_{Γ} – плотность воздуха при температуре t_{Γ} , кг/м^3 .

Коэффициент теплопроводности материала стенки определяется (для пеношамота ПШ-600) по уравнению:

$$\lambda_c = 0,01 + 0,000145 \cdot t_c, \quad (1.52)$$

где $t_c = (t_{\text{вн}} + t_{\text{н}})/2$ – средняя температура стенки, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции определяется по уравнению

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda_{\Gamma}}{d_{\text{ЭКВ}}} \quad (1.53)$$

Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции определяется по уравнению

$$\alpha_{\text{в}} = 0,933 \cdot Re^{0.625} \cdot Pr^{0.33} \quad (1.54)$$

Критерий Рейнольдса Re определяется по формуле

$$Re = \frac{w * d_{\text{ЭКВ}}}{\nu_{\Gamma}} (1.55)$$

где w – скорость движения воздуха, м/с.

Плотность теплового потока, переданного от наружной поверхности стенки излучением, определяется по закону Стефана-Больцмана

$$q_{\text{изд}} = C_0 * \varepsilon_{\text{ст}} * \left(\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right) (1.56)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/м²*К⁴;

$\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты поверхности стенки, для ПШ-600 $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,88$;

$T_{\text{н}}$ и $T_{\text{окр}}$ – абсолютные температуры наружной поверхности стенки и окружающего воздуха соответственно, К.

Суммарная плотность теплового потока конвекцией и излучением от наружной поверхности стенки определяется выражением

$$q_{\text{сум}} = q_{\text{к}} + q_{\text{изд}} (1.57)$$

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

2.1. Лабораторная работа №1 Определение коэффициента политропы в процессе сжатия газа в компрессоре

2.1.1. Цель работы

Изучение процесса сжатия воздуха в поршневом компрессоре и расчет коэффициента политропы в данном процессе.

2.1.2. Теоретическая часть

Сжатие газа осуществляют в поршневых, центробежных и осевых компрессорах.

На рисунке 1. показан теоретический цикл теоретического компрессора процесс всасывания газа происходит изобарно от точки 1 до точки 2 при давлении p_1 , затем происходит процесс политропного сжатия на участке 2 – 3 (2 – 5, 2 – 6). При этом, чтобы открылся нагнетательный клапан давление должно возрасти выше заданного давления p_2 , после открытия клапана начинается изобарное выталкивание сжатого газа (участок 3 - 4) в нагнетательный трубопровод при давлении p_2 . На участке 4-1 происходит политропное расширение газа под поршнем, но, чтобы открылся всасывающий клапан давление должно упасть ниже давления p_1 . После этого весь цикл работы поршневого компрессора повторяется.

Процесс сжатия газа от давления p_1 до давления p_2 может осуществляться по-разному, например, по изотерме 2-3 или адиабате 2 - 5. В реальных компрессорах процесс сжатия хорошо описывается политропой второй группы с показателем $n = 1,2 - 1,3$ (процесс 2 - 6). Как видно из рисунка 1. наименьшая техническая работа, и, следовательно, наименьшие затраты мощности двигателя требуются при изотермическом сжатии 2 - 3. В связи с этим высокопроизводительные компрессоры снабжают системой водяного охлаждения. Из диаграммы (рисунок 1) следует, что самым невыгодным процессом с точки зрения затрат энергии на совершение работы является адиабатный процесс (2 - 5).

Работа, которую должен совершать двигатель компрессора, т.е. техническая работа l_T очевидно отрицательная, поскольку совершается не газом, а над газом. Соответствующая ей площадь на диаграмме $p - V$ (см. рис. 2.1.) зависит от процесса в компрессоре и изображается площадями 1-2-3-4-1 для изотермического сжатия; 1-2-6-3-4-1 для политропного сжатия и 1-2-5-6-3-4-1 для адиабатного сжатия.

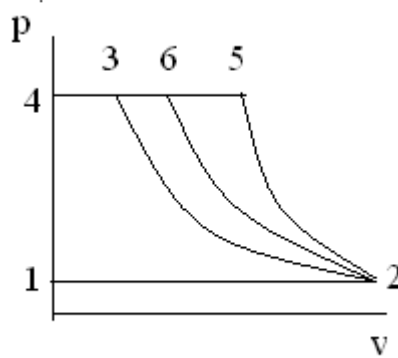


Рис. 2.1. Теоретический процесс работы компрессора

Для определения технической работы компрессора используем уравнение первого закона термодинамики для потока:

$$q = (u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \left(\frac{w_2}{2} - \frac{w_1}{2}\right) + l_T \quad (2.1)$$

в котором обозначим $(u_2 - u_1) = \Delta u$. Пренебрежем вследствие малости изменением кинетической энергии газа и учтем, что техническая работа отрицательна. Тогда получим $q = \Delta u + p_2 v_2 - p_1 v_1 - l_T$.

Откуда

$$l_T = \Delta u + p_2 v_2 - p_1 v_1 - q \quad (2.2)$$

Теплоту процесса сжатия q определим в соответствии с первым законом термодинамики:

$$q = \Delta u + l = \Delta u + \int p dv \quad (2.3)$$

Подставляя это выражение в равенство (2.2) получим в Дж/кг:

$$l_T = p_2 v_2 - \int p dv - p_1 v_1 \quad (2.4)$$

В этом выражении первое слагаемое в правой части - работа нагнетания, второе - работа сжатия, третье - работа всасывания.

Так как основным процессом при сжатии газов является политропный процесс, рассмотрим его подробнее. Уравнение этого процесса;

$$p v^n = const \quad (2.5)$$

где n - показатель политропы.

Если известно начальное и конечное состояние рассматриваемого процесса, показатель политропы определяют следующим образом. Для

указанных состояний записываем уравнение политропы: $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$.
Логарифмируя это равенство, получим

$$\log p_1 + n \log v_1 = \log p_2 + n \log v_2 \quad (2.6)$$

Из этого выражения легко определить:

$$n = \log \left(\frac{p_1}{p_2} \right) / \log \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad (2.7)$$

Работа в политропном процессе может быть определена из общего выражения:

$$1 = \int p dv = \frac{1}{(n-1) \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2)} \quad (2.8)$$

Из выражения (2.8) найдем:

$$1_{\tau} = p_2 v_2 + \frac{1}{(n-1) \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)} - p_2 v_1 \quad (2.9)$$

После преобразования получим:

$$1_{\tau} = \frac{n}{(n-1) \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)} \quad (2.10)$$

При этом можно определить мощность двигателя, Вт:

$$N = \frac{Gn}{(n-1) \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)} \quad (2.11)$$

Что касается теплового потока, то его можно найти с помощью формулы для теплоты политропного процесса:

$$Q = \frac{cv(n-k)}{(n-1)(T_2 - T_1)G}, \text{ Вт} \quad (2.12)$$

Для дальнейшего анализа политропного процесса необходимо знать связь не только между давлением и удельным объемом, выражаемую уравнением политропы $p v^n = \text{const}$, но и между температурой и удельным объемом, а также температурой и давлением. Эти связи находятся из соответствующих уравнений политропного процесса:

$$T v^{(n-1)} = \text{const} T^n p^{(n-1)} \quad (2.13)$$

Связь между температурой и удельным объемом в процессе политропного сжатия будет:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{(n-1)} \quad (2.14)$$

Связь между температурой и давлением в процессе политропного сжатия будет:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (2.15)$$

Из выражения (2.15) можно определить температуру в конце процесса сжатия:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (2.16)$$

2.1.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.3. Установка состоит из поршневого компрессора 1, двух термометров 2, установленных на всасывающей и нагнетательной линии, жидкостного вакуумметра 3 и жидкостного манометра 4.

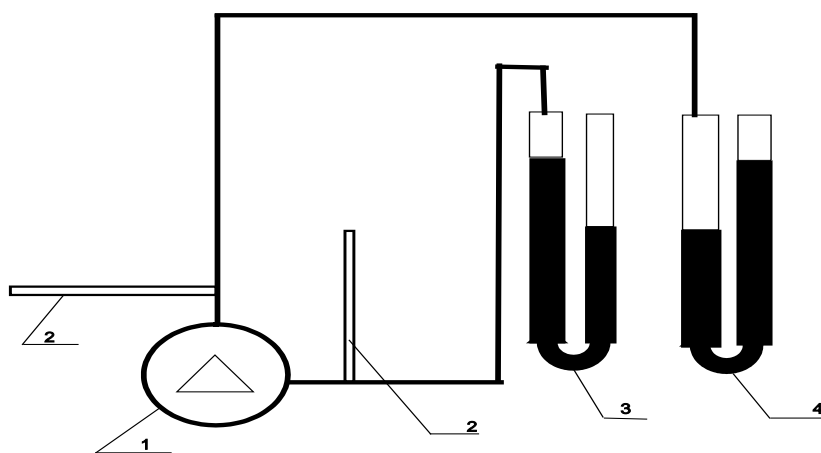


Рис.2.3. Схема лабораторной установки

2.1.4. Порядок проведения работы

1. Проверить уровни жидкости в манометре и вакуумметре.
2. Проверить прочность установки термометров. Если установлены термометры непрочны, то закрепить. Выпадение термометра при работе может привести к разливу ртути.
3. Вручную повернуть ременный шкив компрессора для облегчения запуска.

4. Включить компрессор и сразу снимать показания термометров на входе и выходе, а также вакуумметра и манометра (пока не произошёл теплообмен с окружающей средой).

5. Примерно через 5 минут работы компрессора вновь снять показания термометров, вакуумметра и манометра.

6. Выключить компрессор.

7. По заданию преподавателя изменить сечение трубки на входе или выходе компрессора.

8. Подождать пока термометры на входе и выходе будут показывать одинаковую температуру.

9. Выполнить пункты 4 и 5.

10. По барометру определить давление В.

11. Произвести расчеты и сделать вывод о полученных показателях политропы и сходимости температуры после сжатия (рассчитанной и замеренной).

2.1.5. Обработка результатов эксперимента

1. Внести полученные результаты в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Экспериментальные данные

№ опыта	Начальный момент				Через 5 минут			
	температура, °С		показания, мм вод. ст.		температура, °С		показания, мм вод. ст.	
	на входе	на выходе	вакуумметра	манометра	на входе	на выходе	вакуумметра	манометра

2. Определить абсолютное давление на входе по формуле:

$$P_1 = B - p_1 * 9,81 \text{ и на выходе по формуле: } P_2 = B + p_2 * 9,81,$$

где В - барометрическое давление во время эксперимента, Па;

p_1 и p_2 - разрежение и давление, мм вод. ст.

3. Определить показатель политропы через температуру по формуле:

$$(n-1)/n = \lg(T_2/T_1)/\lg(P_2/P_1).$$

4. Пересчитать плотность воздуха для условий эксперимента.

$$\rho_i = M T_0 P_i / (22,4 T_i P_0),$$

где М - молекулярная масса воздуха, кг/кмоль;

$T_0 = 273 \text{ К}$ - температура нормальных условий;

$P_0 = 101325 \text{ Па}$ - давление нормальных условий;

P_i - давление в i -той точке, Па;

T_i - температура в i -той точке.

5. Определить удельный объем воздуха по формуле:

$$v_i = \frac{1}{\rho_i} \quad (2.17)$$

6. Определить показатель политропы через удельный объем:

$$n = \frac{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\log\left(\frac{v_1}{v_2}\right)} \quad (2.18)$$

7. Сравнить результат с пунктом 2 и сделать вывод.

8. Проверить правильность определения показателя политропы, для этого определить температуру на выходе из компрессора по найденному показателю политропы:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (2.19)$$

9. Определить работу компрессора по формуле:

$$L = \frac{n}{(n-1)} * P_1 v_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} - 1 \right) \quad (2.20)$$

10. Определить массу воздуха, сжатого в компрессоре:

$$G = \frac{N}{\left(\frac{n}{(n-1)} * (P_2 v_2 - P_1 v_1)\right)}, \quad \text{где } N = 370 \text{ Вт} - \text{номинальная мощность}$$

компрессора.

11. Определить объем воздуха, сжатого в компрессоре:

$$V = \frac{G}{\rho_2} \quad (2.21)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется компрессором?
2. Разновидности компрессоров.
3. Основные характеристики поршневых компрессоров.
4. Теоретический цикл работы поршневого компрессора.
5. Чем действительный цикл работы поршневого компрессора отличается от теоретического?
6. Что такое мёртвый объём?
7. Какие пять коэффициентов полезного действия необходимо учитывать при работе компрессора?
8. Что такое политропный процесс?
9. Что такое коэффициент политропы?
10. Как связаны изобарный, изотермический, изохорный и адиабатный процессы?

11. Почему при включении компрессора процесс сжатия близок к адиабате?

12. Почему через некоторое время работы процесс становится изохорным?

Библиографический список

1. Кудинов В.А. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2001, 260 с.

2. Коновалов В.И. Техническая термодинамика: Учебник /В.И. Коновалов; Иван.гос.энерг.ун-т. – Иваново, 2005. – 618 с.: ил.

3. Кудинов В.А. Техническая термодинамика. Учеб.пособ. /В.А.Кудинов, Э.М. Карташов. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 261 с.: ил.

4. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г. Техническая термодинамика. Учеб. пособ. /Новосиб.гос.техн.ун-т. – Новосибирск, 2000. – 98 с.

5. Латыпов Р.Ш., Шарафиев Р.Г. Техническая термодинамика и энерготехнология химических производств, - М.: Энергоатомиздат, 1998, 344 с., ил.

2.2. Лабораторная работа №2

Определение холодильного коэффициента паровой компрессионной холодильной установки

2.2.1. Цель работы

1. Ознакомиться с циклом работы паровой компрессионной холодильной установки.
2. Определить холодильный коэффициент паровой компрессионной холодильной установки на примере бытового холодильника.

2.2.2. Теоретическое введение

Тепловые машины, предназначенные для понижения температуры тел ниже температуры окружающей среды и непрерывного поддержания этой температуры, называются **холодильными установками**. Эти же тепловые машины, предназначенные для повышения температурного уровня окружающей среды, называются **трансформаторами теплоты** или **тепловыми насосами**.

В зависимости от температуры, которая должна быть достигнута при охлаждении, различают холодильные установки умеренного холода (до -70°C) и установки глубокого холода (до -200°C и ниже). Последние обычно используются для сжижения воздуха и других газов.

По характеру рабочего тела (хладагента) холодильные установки подразделяются на воздушные и паровые. В паровых установках хладагентом служат пары различных низкокипящих веществ (аммиака, фреона).

Различают **компрессионные и абсорбционные** установки.

Компрессионные – это установки, в которых энергия для получения холода затрачивается в виде механической работы на привод компрессора, называются, а установки, в которых энергия затрачивается в виде теплоты на термохимическую компрессию - абсорбционные.

Эффективность работы холодильной установки оценивается **холодильным коэффициентом**.

Холодильный коэффициент – это отношение количества теплоты, отнятой за цикл в холодильной камере к затраченной в цикле работе:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{1_{\text{ц}}} = \frac{q_2}{(q_1 - q_2)} \quad (2.22)$$

где q_2 - количество теплоты, отнятой за цикл в холодильной камере, Дж;

q_1 - количество теплоты, отнятой водой или воздухом за цикл в охладителе хладагента, Дж.

В заданном температурном интервале теоретически наиболее выгодным циклом холодильной установки является обратный цикл Карно. Для обратного цикла Карно холодильный коэффициент может быть выражен через температуру.

$$\varepsilon_{\text{Карно}} = \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_2} - 1\right)} \quad (2.23)$$

Увеличение эффективности холодильных установок связано с понижением температуры окружающей среды T_1 и с повышением температуры охлаждаемого помещения T_2 , т.е. с уменьшением температурного интервала $(T_1 - T_2)$ затрачиваемая работа уменьшается. Однако из-за конструктивных трудностей и больших потерь на трение обратный цикл Карно неосуществим.

В промышленности холод впервые был получен с помощью воздушных компрессионных холодильных установок, но в настоящее время они применяются редко из-за низкой эффективности и громоздкости.

Цикл паровой компрессионной холодильной установки представлен в разделе 1.

2.2.3. Описание установки

В схеме компрессор и электродвигатель размещены в общем геометрическом кожухе 1 (рис. 2.4).

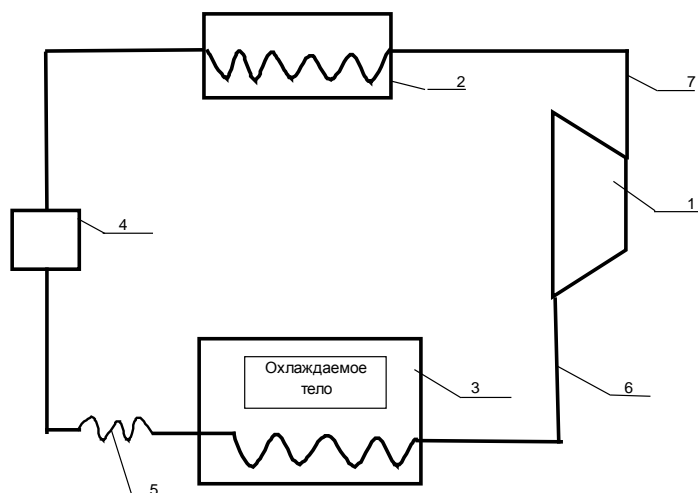


Рис. 2.4 Схема лабораторной установки

Компрессор засасывает сухой насыщенный пар фреона (хладагент) из испарителя 3 по всасывающему трубопроводу 6. В компрессоре пар фреона сжимается и по нагнетательному трубопроводу 7 направляется в конденсатор 2, где пар охлаждается и конденсируется до состояния кипящей жидкости.

Кипящий жидкий хладагент из конденсатора, проходя через фильтр 4, по капиллярной трубке 5, играющей роль дросселя, поступает в испаритель 3, где испаряется за счёт отбора тепла от продуктов и воздуха внутри холодильника. Хладагент, превратившийся в сухой насыщенный

пар, возвращается из испарителя 3 в компрессор 1 по всасывающему трубопроводу 6 и цикл повторяется.

2.2.4. Порядок проведения работы

1. Разместить термометр в испарителе.
 2. Взвесить ванночку G_2 с точностью до 10^{-4} кг, налить в неё 200 мл дистиллированной воды и взвесить G_1 .
 3. Определить температуру воды $t_{1нач}$ и в испарителе до эксперимента $t_{2нач}$.
 4. Установить ванночку в испаритель.
 5. Фиксировать время работы компрессора холодильника с точностью до секунды.
 6. Когда суммарное время работы компрессора превысит 3600 с, извлечь ванночку из испарителя, посмотрев при этом значения температур.
 7. Взвесить ванночку со льдом и водой - G_3 , лед - G_4 и оставшейся незамерзшей воды - G_5 .
 8. Массу вымороженной из воздуха воды найти как $G_6 = G_3 - G_1$.
- Примечание. Масса вымороженной из воздуха воды G_6 может иметь как положительное, так и отрицательное значение, в случае, если влага из воздуха испарительной камеры вымораживается в лед, то G_6 будет иметь положительное значение, а если вода из ванночки переходит в воздух испарительной камеры, то G_6 будет иметь отрицательное значение.
9. Полученные результаты занести в таблицу 2.2.

2.2.5. Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать количество теплоты, отнятой в холодильнике у охлаждаемых материалов и воздуха по формуле:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2.24)$$

где Q_1 – тепло, отнятое у воздуха, Дж;

Q_2 – тепло, отнятое у воды, Дж;

Q_3 – тепло, отнятое у ванночки, Дж;

Q_4 – тепло образования льда, Дж;

Q_5 – тепло конденсации водяных паров, Дж.

Экспериментальные данные

Время работы компрессора, τ с	Мощность двигателя N , Вт	Полезный объем холодильника V , m^3	Температура, $^{\circ}C$				Масса, кг					
			до испытания		после испытания		воды, $(G_1 - G_2)$	ванночки, G_2	ванночки с водой и льдом, G_3	льда, G_4	незамерзшей воды, G_5	вымороженной воды из воздуха, G_6
			воды, $t_{1нач}$	в испарителе, $t_{2нач}$	незамерзшей воды, $t_{1кон}$	в испарителе, $t_{2кон}$						

$$Q_1 = V * \rho_{возд} * c_{возд} * (t_{2кон} - t_{2нач}), \quad (2.25)$$

где $\rho_{возд}$ – плотность воздуха, kg/m^3 ;

$c_{возд}$ – теплоемкость воздуха, $Dж/(кг*К)$.

$$Q_2 = (G_1 - G_2) * c_{воды} * (t_{1кон} - t_{1нач}), \quad (2.26)$$

где $c_{воды}$ – теплоемкость воды, $4180 Dж/(кг*К)$.

$$Q_3 = G_2 * c_{ст} * (t_{2кон} - t_{1нач}), \quad (2.27)$$

где $c_{ст}$ – теплоемкость стали, $Dж/(кг*К)$.

$$Q_4 = q * G_4, \quad (2.28)$$

где $q = 332400 Dж/кг$ – удельная теплота плавления льда.

$$Q_5 = r * G_6, \quad (2.29)$$

где $r = 2,5 * 10^6 Dж/кг$ – теплота конденсации водяных паров.

12.

13. Рассчитать холодильный коэффициент ϵ по формуле:

$$\epsilon = \frac{Q}{(N * \tau)} \quad (2.30)$$

3. Сделать вывод по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется холодильной установкой?

2. Классификация холодильных установок.

- 3.Современные требования, предъявляемые к хладагентам.
- 4.Опишите схему и принцип работы воздушной холодильной установки.
- 5.Опишите схему и принцип работы паровой компрессионной холодильной установки.
- 6.Что такое хладопроизводительность холодильной установки?
- 7.Как рассчитать хладопроизводительность через энтальпию?
- 8.Что такое холодильный коэффициент?
- 9.Как рассчитать холодильный коэффициент?

Библиографический список

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. /Под ред. В.Г.Айнштейна. – М.: Химия, 2000, 540 с. с ил.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Альянс, 2005, 752 с. с ил.
3. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2 т.- М.: Химия, 1981. 812 с. с ил.
4. Павлов К. Ф., Романков П.Г., Носков А. А. Примеры и по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.:Химия,1987, 560 с. с ил.
5. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред.Ю.И. Дытнерского – М.:Химия, 1983. 272 с.
6. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1983. 164с.

2.3. Лабораторная работа №3

Определение тепловых потоков в процессе теплопередачи

2.3.1. Цель работы

1. Определение температурного графика нагрева и охлаждения материала.
2. Определение тепловых потоков теплопроводностью, конвекцией и тепловой радиацией при свободном и вынужденном движении воздуха.
3. Определение потерь теплоты при свободной и вынужденной конвекции.

2.3.2. Теоретическая часть

Если рассмотреть тепловой поток нагрева коксовой печи, то известно, что внутренняя поверхность огнеупорной кладки рабочего пространства печей имеет высокую температуру. Наружная поверхность, несмотря на относительно слабую проводимость теплоты огнеупорными материалами, также имеет более высокую температуру в сравнении с температурой окружающего атмосферного воздуха.

Температурное состояние тела в обоих случаях характеризуется дифференциальным уравнением теплопроводности, которое при одномерном тепловом потоке имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} (2.31)$$

где $\partial t / \partial \tau$ – скорость изменения температуры, град./с;

$a = \lambda_c / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

x – текущая координата, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м*К);

c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг*К);

ρ – плотность материала, кг/м³.

Так как при стационарном режиме $\partial t / \partial \tau = 0$, то уравнение (2.31) будет иметь следующий вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 (2.32)$$

Уравнение (2.31) – это дифференциальное уравнение теплопроводности при стационарном тепловом режиме для одномерного (по оси x) теплового потока. Дважды интегрируя это уравнение, получаем последовательно

$$\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 (2.33)$$

$$t = C_1 * x + C_2 (2.34)$$

Из уравнения (2.34) следует, что при $\lambda = \text{const}$ распределение температуры по толщине стенки при стационарном тепловом режиме происходит по прямой линии. Уравнение (2.34) – это общее решение уравнения (2.32). Если задать температуры внутренней и наружной поверхности (частный случай граничных условий 1 рода), то можно найти значения постоянных C_1 и C_2 .

При $x = 0, t = t_{\text{вн}}$. Тогда из уравнения (2.35) находим, что $C_2 = t_{\text{вн}}$.

При $x = S, t = t_{\text{н}}$, тогда по уравнению (2.35) $t_{\text{н}} = C_1 * S + t_{\text{вн}}$.

Отсюда $C_1 = - (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})/S$,

где $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{н}}$ – соответственно температуры внутренней и наружной поверхности, $^{\circ}\text{C}$;

S – толщина стенки, м.

После подстановки в уравнение (2.34) оно будет иметь следующий вид

$$t = t_{\text{вн}} - \left((t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) * \frac{x}{S} \right) \quad (2.35)$$

Уравнение (2.35) является частным решением уравнения (2.32) и позволяет определить температуру в любой точке по толщине кладки при стационарном режиме. Стационарное тепловое состояние характеризуется также постоянством количества теплоты, проходящей через наружные стены, например, коксовых печей.

При нестационарном тепловом режиме работает кладка внутренних частей коксовой батареи (вертикалы, стены коксовых камер и т.д.).

Для определения плотности теплового потока $q = Q/F$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$), проходящего через плоскую стенку площадью F (м^2) путём теплопроводности, используется уравнение Фурье

$$q = -\lambda * \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2.36)$$

С учетом уравнения (2.33) напишем, что

$$\frac{\partial t}{\partial x} = C_1 = - \left(\frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{S} \right) \quad (2.37)$$

Тогда

$$q = \frac{\lambda}{S} * (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \quad (2.38)$$

От наружной поверхности кладки теплота обычно передаётся в окружающую среду путём:

1. Конвекции свободной или вынужденной;
2. Тепловой радиацией.

Свободная конвекция происходит при скорости движения воздуха W менее 5 м/с. Механизм свободной конвекции связан с тем, что воздух нагреваясь, становится менее плотным и поднимается вверх, а на место ему приходит более плотный холодный воздух. Т.е. движущей силой свободной конвекции является разность плотностей холодного и теплого воздуха в поле действия гравитационных сил.

Передача тепла конвекцией описывается уравнение Ньютона-Рихмана (закон конвекции)

$$q_k = a * (t_n - t_{окр}), \quad (2.39)$$

где t_n и $t_{окр}$ – соответственно температуры наружной поверхности кладки и окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

a – коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной стенки к воздуху, который характеризует интенсивность передачи тепла конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$.

Коэффициент теплоотдачи обычно определяют экспериментально методом, используя теорию подобия, получают критериальные уравнения.

Для свободной конвекции экспериментальные данные представляют в виде критериальной зависимости М.А.Михеева

$$Nu = C * (Gr * Pr)^n \quad (2.40)$$

где Nu – критерий Нуссельта, выражающий теплообмен на границе раздела воздух – пограничный слой, или отношение внутреннего теплового сопротивления пограничного слоя к внешнему тепловому сопротивлению воздуха передаче тепла конвекцией:

$$Nu = a * \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.41)$$

где a – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/\text{м}^2 * \text{К}$;

λ_r – коэффициент теплопроводности воздуха в пограничном слое при температуре t_r пограничного слоя, $\text{Вт}/\text{м} * \text{К}$.

Температура пограничного слоя на границе раздела воздух – стенка определяется по уравнению

$$t_r = 0,5 * (t_n + t_{окр}) \quad (2.42)$$

Критерий Грасгофа, выражающий отношение подъемной силы, обусловленной разностью температур наружной поверхности стенки и окружающего воздуха к силам вязкости на границе раздела рассчитывается

$$Gr = \frac{g * d_{эКВ}^3 * \beta * \Delta t}{\nu_r^2} \quad (2.43)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр, м ;

β – коэффициент объёмного расширения воздуха, град.^{-1} ;

$\Delta t = (t_{\text{н}} - t_{\text{окр}})$ – разность температур между наружной поверхностью стенки и окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

$\nu_{\text{г}}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха на границе раздела при температуре $t_{\text{г}}$, $\text{м}^2/\text{с}$.

Эквивалентный диаметр определяется по выражению

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot S}{\Pi} \quad (2.44)$$

где S – площадь охлаждаемой стенки, м^2 ;

Π – периметр охлаждаемой стенки, м .

Критерий Прандтля, выражающий отношение инерционных сил гидродинамических к тепловым определяется из выражения

$$Pr = \frac{c_{\text{г}} \cdot \nu_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\lambda_{\text{г}}} \quad (2.45)$$

где $c_{\text{г}}$ – удельная теплоёмкость воздуха при температуре $t_{\text{г}}$, $\text{Дж/м}^3 \cdot \text{К}$;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха при температуре $t_{\text{г}}$, кг/м^3 .

Коэффициенты C и n в формуле (2.40) являются эмпирическими и зависят от комплекса $(Gr \cdot Pr)$ как показано в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Значения C и n в зависимости от комплекса $(Gr \cdot Pr)$

$(Gr \cdot Pr)$	C	n
До 10^{-3}	0,45	0
10^{-3} до $5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Более $2 \cdot 10^7$	0,135	0,333

Значения параметров, применяемых в расчете, приведены в таблице 2.4.

Коэффициент теплопроводности материала стенки определяется (для пеношамота ПШ-600) по уравнению:

$$\lambda_{\text{с}} = 0,01 + 0,000145 \cdot t_{\text{с}} \quad (2.46)$$

где $t_{\text{с}} = \frac{(t_{\text{вн}} + t_{\text{н}})}{2}$ – средняя температура стенки, $^{\circ}\text{C}$.

Параметры воздуха в пограничном слое

Температура, °С	Коэффициент кинематической вязкости, м ² /с*10 ⁵	Коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м*К	Удельная теплоёмкость, Дж/м ³ *К
0	1,328	0,0244	1300,90
10	1,416	0,0251	1301,32
20	1,506	0,0260	1301,74
30	1,600	0,0268	1302,16
40	1,696	0,0275	1302,58
50	1,795	0,0283	1303,00
60	1,897	0,0290	1303,42
70	2,092	0,0297	1303,84
80	2,109	0,0304	1304,26
90	2,210	0,0314	1304,68
100	2,313	0,0321	1305,10

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции определяется по уравнению

$$a_c = \frac{Nu * \lambda_{\Gamma}}{d_{\text{ЭКВ}}} (2.47)$$

Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции определяется по уравнению

$$a_B = 0,933 * Re^{0.625} * Pr^{0.33} (2.48)$$

Критерий Рейнольдса Re определяется по формуле

$$Re = w * \frac{d_{\text{ЭКВ}}}{\nu_{\Gamma}} (2.49)$$

где w – скорость движения воздуха, м/с.

Плотность теплового потока, переданного от наружной поверхности стенки излучением, определяется по закону Стефана-Больцмана

$$q_{\text{изд}} = C_0 * \varepsilon_{\text{ст}} * \left(\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right) (2.50)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/м²*К⁴;

$\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты поверхности стенки, для ПШ-600 $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,88$;

$T_{\text{н}}$ и $T_{\text{окр}}$ – абсолютные температуры наружной поверхности стенки и окружающего воздуха соответственно, К.

Суммарная плотность теплового потока конвекцией и излучением от наружной поверхности стенки определяется выражением

$$q_{\text{сум}} = q_{\text{к}} + q_{\text{изд}} \quad (2.51)$$

2.3.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (см. рис. 2.5.) состоит из огнеупорного изделия 1, в торец которого вмонтированы на разных уровнях три хромель-алюмелевые термопары 2. Термопары 2 через переключатель 5 присоединены к милливольтметру 4, отградуированному в градусах Цельсия. Огнеупорное изделие 1 установлено на электроплитке 3, имеющей три уровня нагрева. При необходимости огнеупорное изделие 1 может обдуваться воздухом, подаваемым вентилятором 6, включенным через ЛАТР.

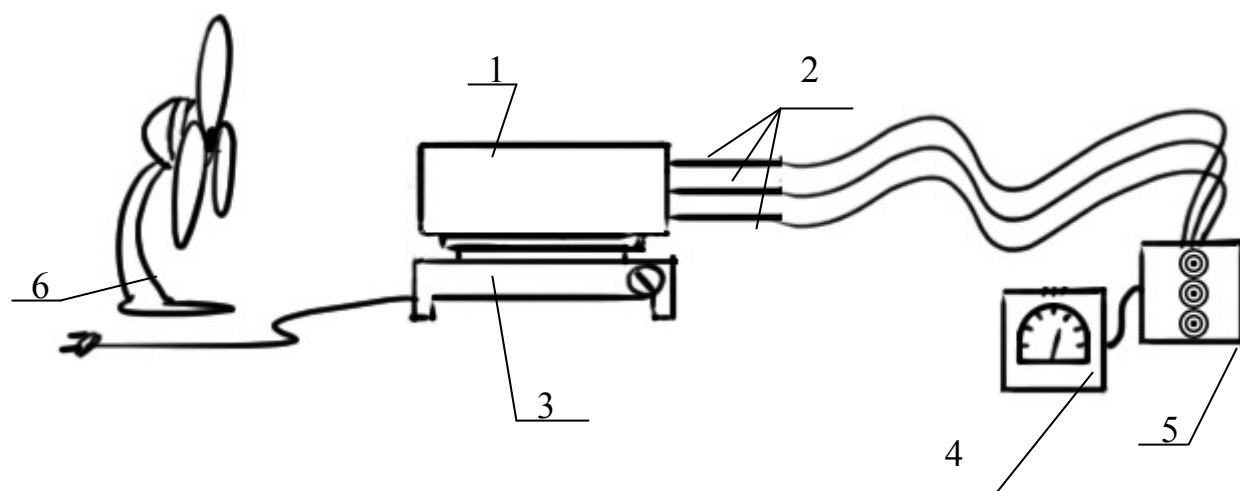


Рис. 2.5. Схема лабораторной установки

2.3.4. Порядок проведения опыта

1. Проверить исправность проводки и подключение схемы.
2. Установить положение обогрева на плитке 3 на уровень, указанный преподавателем.
3. Через каждые 5 минут фиксировать на милливольтметре 4 показания термопар 2.
4. Фиксировать температуру на всех трех термопарах до тех пор, пока она не будет постоянной.
5. Установить на ЛАТРе напряжение, указанное преподавателем, включить вентилятор. Скорость движения воздуха w зависит от напряжения U , установленного на ЛАТРе как показано в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Зависимость скорости движения воздуха от напряжения ЛАТРа

U, В	W, м/с
130	1,5
140	2,1
150	2,5
160	3,0
170	4,5
180	5,0
190	5,5
200	5,7
220	6,0

6. Через каждые 5 минут фиксировать значения температуры всех трех термопар до тех пор, пока они не станут постоянными.

7. Отключить ЛАТР и электроплитку.

8. Снятые показания представить преподавателю в виде таблицы 2.6.

Таблица 2.6

Результаты проведения эксперимента

Время, минут	Температура, °С						
	окруж.среды	Нагревание			Охлаждение		
		внутр.	центр.	наруж.	внутр.	центр.	наруж.
0							
5							
10							
.....							

2.3.5. Обработка результатов

1. По данным таблицы 2.6 строим график нагрева материала и график охлаждения материала. На графике должно быть три линии, соответствующие внутренней поверхности, центру и наружной поверхности.

2. Рассчитать критерий Грасгоффа Gr по формуле (2.40).

3. Рассчитать критерий Прандтля Pr по формуле (2.43).

4. Рассчитать критерий Рейнольдса Re по формуле (2.45).

5. Рассчитать критерий Нуссельта Nu по формуле (2.49).

6. Рассчитать плотность теплового потока теплопроводностью q , проходящую через изделие по формуле (2.37) как для периода нагрева, так и для периода охлаждения.

7. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности при нагреве (свободная конвекция) α_c по формуле (2.47).

8. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности при охлаждении (вынужденная α_v (по формуле 2.48) или свободная α_c конвекция). Конвекция различается в зависимости от скорости движения воздуха, если $w > 1$ м/с, то вынужденная конвекция.

9. Рассчитать плотность теплового потока конвекцией при нагревании и охлаждении q_k по формуле (2.38).

10. Рассчитать плотность теплового потока излучением $q_{изл}$ по формуле (2.50).

11. Рассчитать суммарную плотность теплового потока $q_{сум}$ по формуле (2.51).

12. Построить график зависимости плотности теплового потока теплопроводностью, конвекцией, тепловым излучением и суммарный в период нагревания.

13. Построить график зависимости плотности теплового потока теплопроводностью, конвекцией, тепловым излучением и суммарный в период охлаждения.

14. Написать вывод, в котором сравнить тепловые потоки при естественной и вынужденной конвекции.

Контрольные вопросы

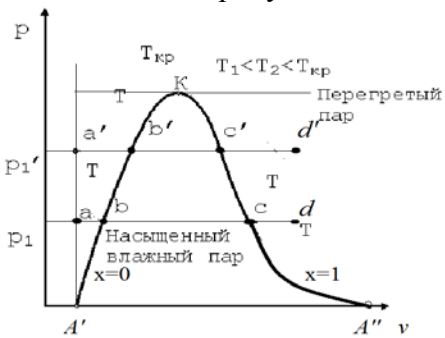
1. Что называется стационарным тепловым режимом?
2. Что называется теплопроводностью?
3. Написать дифференциальное уравнение теплопроводности при стационарном тепловом режиме?
4. Написать закон Фурье.
5. Что называется коэффициентом теплопроводности, его размерность, обозначение?
6. От каких факторов зависит коэффициент теплопроводности?
7. Написать формулу для определения теплового потока плоской стенки.
8. Что такое внутреннее тепловое сопротивление?
9. Привести пример теплообменных аппаратов, работающих при стационарном тепловом режиме.
10. Что такое свободная конвекция и чем она обуславливается?
11. Что такое вынужденная конвекция и чем она обуславливается?
12. Закон Ньютона-Рихмана и плотность теплового потока
13. Закон Стефана-Больцмана и плотность теплового потока, переданного излучением.
14. От чего зависят суммарные тепловые потери с поверхности изделий?

Библиографический список

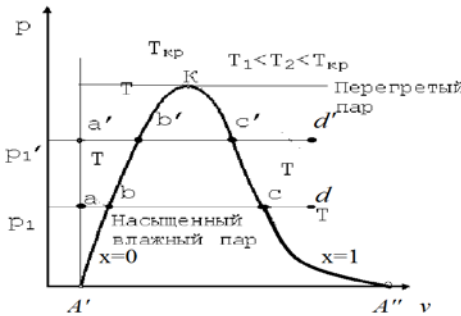
1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Учебник [В 2 кн./В.Г.Айнштейн, М.К.Захаров, Г.А.Носов и др.] Под ред. В.Г.Айнштейна - М., Логос, 2003.
2. Касаткин Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Логос, 2005, 752 с.: ил.
3. Вейнский В.В. Процессы и аппараты химической технологии.: Учебное пособие/В.В.Вейнский, А.В.Горохов; МГТУ. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. 176 с.: ил.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. СПб.: Химия, 2005. 575с.
5. Латыпов Р.Ш., Шарафиев Р.Г. Техническая термодинамика и энерготехнология химических производств, - М.: Энергоатомиздат, 1998, 344 с., ил.
5. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника-М.:Высшая школа, 1986, 344 с., ил.
6. Коновалов В.И. Техническая термодинамика: учебник / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2005. 618 с.: ил.
7. Кудинов В.А. Техническая термодинамика: учеб. пособие. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2003. 261 с.: ил.

КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

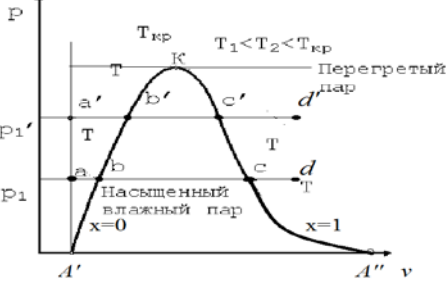
Вариант 1

<p>1.Общая количественная мера для всех форм движения материи –</p> <p>1-энергия 2 -работа 3- теплообмен 4- теплота</p>	<p>6.Линия КА' на рисунке –</p>  <p>1-верхняя пограничная; 2-нижняя пограничная; 3-нулевая линия.</p>
<p>2.Математическое выражение первого закона термодинамики для изохорного процесса:</p> <p>1- $\Delta U = 0$; 2- $\Delta U = Q$; 3- $\Delta U = L$; 4- $Q = L$.</p>	<p>7.Состояние влажного насыщенного пара обычно характеризует давление и ...</p> <p>1- степень сухости; 2- температура; 3- теплоемкость; 4- теплота парообразования.</p>
<p>3.Процесс, в котором теплоемкость рабочего тела равна нулю:</p> <p>1- изотермический; 2- изобарный; 3- изохорный; 4- адиабатный.</p>	<p>8.Процесс реального газа, в котором подведенная теплота рассчитывается по формуле: $q = h_2 - h_1$</p> <p>1- изохорный; 2- изобарный; 3- изотермический; 4- адиабатный.</p>
<p>4. Уравнение термодинамического процесса: $pv^n = \text{const}$, где n:</p> <p>1- показатель адиабаты; 2- показатель политропы; 3- коэффициент сжимаемости; 4- постоянная Больцмана.</p>	<p>9.Цикл, термический КПД которого больше, чем у любого другого цикла, совершающегося в том же интервале температур:</p> <p>1- Карно; 2- Отто; 3- Дизеля; 4- Ренкина.</p>
<p>5.Процесс, график которого в T -s диаграмме – отрезок горизонтальной прямой –</p> <p>1-адиабатный; 2-изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный.</p>	<p>10. Отрыв факела происходит когда:</p> <p>1- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно меньше скорости горения; 2- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно больше скорости горения.</p>
<p>Задача Нагреватель идеальной тепловой машины имеет температуру 527°С, а холодильник - +127°С. Определите КПД данной машины (%).</p>	

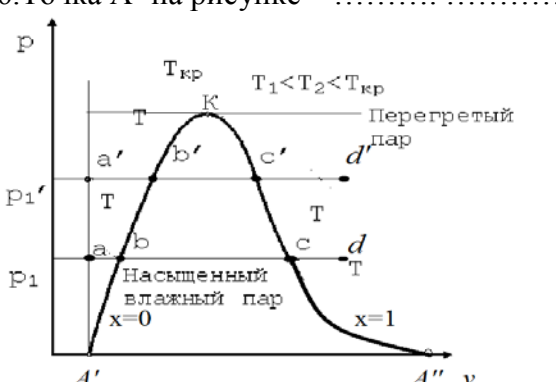
Вариант 2

<p>1. Газовая постоянная – работа, которую совершает 1кг газа при увеличении его температуры на 1К в процессе:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- изобарном; 2- изохорном; 3- изотермическом; 4- адиабатном. 	<p>6. Линия КА' на рисунке –</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1- верхняя пограничная; 2- нижняя пограничная; 3- нулевая линия.
<p>2. Математическое выражение первого закона термодинамики для изотермического процесса:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- $Q = L$; 2- $\Delta U = Q$; 3- $\Delta U = L$; 4- $Q = -L$. 	<p>7. Площадь под линией процесса в p-v диаграмме численно равна:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- работе процесса; 2- теплоте процесса; 3- изменению энтальпии; 4- изменению внутренней энергии.
<p>3. Процесс, график которого в p-v диаграмме – отрезок горизонтальной прямой –</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- адиабатный; 2- изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный. 	<p>8. Термический КПД прямого цикла определяется по формуле: $\eta_t = 1 - q_1/q_2$, где: q_1 –</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- подведенная теплота; 2- отведенная теплота.
<p>4. Процесс, в котором отсутствует теплообмен рабочего тела с окружающей средой –</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- адиабатный; 2- изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный. 	<p>9. Цикл, в котором теплота превращается в работу:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- прямой; 2- обратный; 3- равновесный; 4- бинарный.
<p>5. Процесс, график которого в T-s диаграмме – отрезок горизонтальной прямой –</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- адиабатный; 2- изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный. 	<p>10. Проскок факела происходит когда:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно меньше скорости горения; 2- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно больше скорости горения.
<p>Задача Какой должна быть температура холодильника тепловой машины ($^{\circ}\text{C}$), чтобы максимальное значение КПД равнялось 50%? Температура нагревателя 327°C.</p>	

Вариант 3

<p>1.Термодинамическая система, поверхность которой проницаема для потока вещества:</p> <p>1- открытая; 2- проточная; 3- нестационарная; 4- неравновесная.</p>	<p>6.Линия КА'' на рисунке –</p>  <p>1-верхняя пограничная; 2-нижняя пограничная; 3-нулевая линия.</p>
<p>2.Математическое выражение первого закона термодинамики для адиабатного процесса:</p> <p>1- $\Delta U = 0$; 2- $\Delta U = Q$; 3- $\Delta U = -L$; 4- $Q = L$.</p>	<p>7.Цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат:</p> <p>1- Карно; 2- Отто; 3- Дизеля; 4- Стирлинга.</p>
<p>3.Процесс, в котором вся подведенная к рабочему телу теплота превращается в работу</p> <p>1- изотермический; 2- изобарный; 3- изохорный; 4- адиабатный.</p>	<p>4.Смесь кипящей жидкости и сухого насыщенного пара –</p> <p>1-влажный насыщенный; 2-сухой насыщенный 3- сухой перегретый.</p>
<p>4.Процесс, в котором изменение энтропии равно нулю:</p> <p>1- изотермический; 2- изобарный; 3- изохорный; 4- адиабатный.</p>	<p>9. Отрыв факела происходит когда:</p> <p>1- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно меньше скорости горения; 2- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно больше скорости горения.</p>
<p>5.Процесс, в котором изменение внутренней энергии газа равно подведенной (отведенной) теплоте</p> <p>1-адиабатный; 2-изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный.</p>	<p>10.Если сухость влажного насыщенного пара $x = 0,15$, то влажность пара</p> <p>1- 0,15; 2- 0,85; 3- 1,15; 4- 0,35.</p>
<p>Задача Тепловой двигатель за один цикл получает от нагревателя 100 кДж теплоты и отдает холодильнику 60 кДж. Чему равен КПД этого двигателя (%)?</p>	

Вариант 5

<p>1.Количество энергии, передаваемой в результате теплообмена –</p> <p>1-энергия 2-работа 3- теплообмен 4- теплота</p>	<p>6.Точка А' на рисунке –</p>  <p>1-двойная точка; 2-тройная точка; 3-критическая точка.</p>
<p>2.Соотношение параметров в изотермическом процессе:</p> <p>1- $p_2/p_1 = T_2/T_1$; 2- $p_2/p_1 = T_1/T_2$; 3- $p_2/p_1 = v_2/v_1$; 4- $p_2/p_1 = v_1/v_2$.</p>	<p>7.Процесс реального газа, в котором подведенная теплота рассчитывается по формуле: $q = T(s_2 - s_1)$:</p> <p>1- изохорный; 2- изобарный; 3- изотермический; 4- адиабатный.</p>
<p>3.Процесс, график которого в T -s диаграмме – отрезок вертикальной прямой –</p> <p>1-адиабатный; 2-изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный.</p>	<p>8.Смесь сухого воздуха и сухого насыщенного водяного пара –</p> <p>воздух</p> <p>1-влажный насыщенный; 2-сухой насыщенный; 3- сухой перегретый.</p>
<p>4.Процесс, в котором работа совершается за счет убыли внутренней энергии рабочего тела –</p> <p>1-адиабатный; 2-изотермический; 3- изохорный; 4- изобарный.</p>	<p>9. Отрыв факела происходит когда:</p> <p>1- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно меньше скорости горения; 2- скорость смешивания топливо-воздушной смеси значительно больше скорости горения.</p>
<p>5.Пар, температура которого больше температуры насыщения при данном давлении..</p> <p>1-влажный насыщенный; 2-сухой насыщенный; 3- сухой перегретый.</p>	<p>10. Горелка с полным предварительным смешиванием топлива и воздуха имеет параметры:</p> <p>1- $L > 20d$, $\epsilon > 0,85$; 2- $L = 15-18d$, $\epsilon = 0,75$; 3- $L = 8-12d$, $\epsilon = 0,55$; 4- $L < 8d$, $\epsilon < 0,5$.</p>
<p>Задача Температура нагревателя реальной тепловой машины 127°C, холодильника - $+27^\circ\text{C}$. За один цикл газ получает от нагревателя 64 кДж теплоты, а отдаёт холодильнику 48 кДж. Определите КПД машины (%).</p>	

ДОМАШНЕЕ РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ «РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ»

Расчет горения топлива включает:

- 1) расчет необходимого для горения топлива воздуха или обогащенного кислородом дутья;
- 2) расчет количества и состава продуктов сгорания;
- 3) расчет температуры горения топлива.

4.1. Формулировка задания

4.1.1. Задача 1

Рассчитать горение твердого топлива с элементным анализом на сухую массу (таблица 4.1):

1) Определить необходимый объем кислорода на горение твердого топлива;

2) Определить состав и объем продуктов горения твердого топлива;

3) Определить калориметрическую температуру горения твердого топлива.

Для расчета использовать следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха (колонка 8, таблица 4.1);
- относительная влажность воздуха (колонка 6, таблица 4.6);
- атмосферное давление (колонка 7, таблица 4.6);
- парциальное давление водяного пара (колонка 8, таблица 4.6);
- температура поступающего из атмосферы воздуха (колонка 9, таблица 4.6);
- температура нагрева воздуха (колонка 4, таблица 4.6);
- пиротехнический коэффициент (колонка 10, таблица 4.6).

4.1.2. Задача 2

Рассчитать горение мазута с элементным анализом на сухую массу (таблица 4.2):

1) Определить необходимый объем кислорода на горение мазута;

2) Определить состав и объем продуктов горения мазута;

3) Определить калориметрическую температуру горения мазута.

Для расчета использовать следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха (колонка 8, таблица 4.2);
- относительная влажность воздуха (колонка 6, таблица 4.6);
- атмосферное давление (колонка 7, таблица 4.6);
- парциальное давление водяного пара (колонка 8, таблица 4.6);
- температура поступающего из атмосферы воздуха (колонка 9, таблица 4.6);
- температура нагрева воздуха (колонка 4, таблица 4.6);

- температура нагрева мазута (колонка 3, таблица 4.6);
- теплоемкость мазута (колонка 5, таблица 4.6);
- пиротехнический коэффициент (колонка 10, таблица 4.6).

4.1.3. Задача 3

Рассчитать горение смеси газов I и II (таблица 4.3.) с теплотой сгорания смеси газов (колонка 13, таблица 4.5), элементный анализ газов на сухую массу (таблица 4.4 и 4.5):

- 1) Определить необходимый объем кислорода на горение смеси газов;
- 2) Определить состав и объем продуктов горения смеси газов;
- 3) Определить калориметрическую температуру горения смеси газов.

Для расчета использовать следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха (колонка 14, таблица 4.5);
- относительная влажность воздуха (колонка 6, таблица 4.6);
- атмосферное давление (колонка 7, таблица 4.6);
- парциальное давление водяного пара (колонка 8, таблица 4.6);
- температура поступающего из атмосферы воздуха (колонка 9, таблица 4.6);
- температура нагрева воздуха (колонка 4, таблица 4.6);
- температура нагрева газа (колонка 2, таблица 4.6);
- пиротехнический коэффициент (колонка 10, таблица 4.6).

Таблица 4.1

Данные к задаче 1

№ варианта	Элементный состав на сухую массу, масс. %					W ^P , %	коэффициент избытка воздуха α
	C	H	O	S	N		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	73	6	17	3,5	0,5	10	1,3
2	94	3	1	1,5	0,5	4,5	1,45
3	69,5	5,5	21	3,5	0,5	17	1,2
4	65	5	29	0,5	0,5	22,5	1,1
5	78	6	13	2,5	0,5	13	1,25
6	86	5,5	4,5	2,5	1,5	8,5	1,5
7	95,5	1,25	1	2	0,25	7,5	1,35
8	66	5,8	23,7	3	1,5	20,5	1,3
9	64	5,5	26	3,5	1	25	1,15
10	80	5,8	12,7	0,5	1	15	1,3
11	82,5	5,9	9,2	1,5	0,9	9	1,55
12	95,5	1,2	1,05	1,75	0,5	6	1,4
13	67	6	23,5	2,5	1	27	1,25
14	64,5	5,6	27,9	0,5	1,5	23,52	1,2
15	82	5,3	10	2,25	0,45	19	1,2
16	88	6	4,75	1	0,25	7	1,45
17	96,5	1	1	1,2	0,3	5	1,45
18	68	5,3	23,2	3	0,5	26,35	1,2
19	66	6	25	2,5	0,5	17,25	1,25
20	82	5,4	9,1	2,5	1	14	1,2
21	79	5,8	12,2	2,5	0,5	7,5	1,25
22	95,5	1,2	1,2	1,5	0,6	3,5	1,35
23	69	6	21	3,5	0,5	22,5	1,3
24	63	6	27	2,5	1,5	35	1,1
25	83	5,5	7	4	0,5	15	1,35
26	88	5	6	0,5	0,5	5,5	1,5
27	96,5	1,4	0,5	1,1	0,5	2,5	1,45
28	70	5,2	19,3	4	1,5	17	1,2
29	67	5,5	24,5	2,5	0,5	22	1,15
30	83	5,7	9,3	1,5	0,5	19	1,3
31	79	5,5	12,5	2,5	0,5	9,5	1,5
32	97	1,1	1	0,4	0,5	1,9	1,35
33	73	5,9	18,6	2	0,5	16	1,25
34	65	6	27	1,5	0,5	22	1,25

Таблица 4.2

Данные к задаче 2

№ варианта	Элементный состав на сухую массу, масс. %					W ^p , %	коэффициент избытка воздуха α
	C	H	O	S	N		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	87,83	10,39	0,29	0,98	0,51	2	1,15
2	83,0	10,0	5,3	0,9	0,8	1,9	1,1
3	90,32	6,96	1,62	3,5	0,5	17	1,2
4	84,86	9,98	4	0	1,16	1,5	1,25
5	83,7	10,1	1,1	4,42	0,68	2,2	1,1
6	83,5	10,1	4,8	0,7	0,9	1,9	1,15
7	92,19	5,85	0,66	0,8	0,5	1,2	1,25
8	84,5	10	3,95	1	0,55	1,8	1,25
9	84,8	10,7	0,2	4	0,3	2,2	1,15
10	86,7	7,7	3,8	0,7	1,1	1,8	1,25
11	90,32	6,42	1,65	1,1	0,51	2	1,12
12	82,56	11,08	4,58	1,33	0,45	1,7	1,2
13	80,45	17,83	0,54	0,67	0,51	1,9	1,2
14	83	9,5	5,65	0,7	1,15	1,2	1,1
15	93,12	5,35	0,52	0,5	0,51	2,9	1,3
16	84,05	10,39	4,21	0,81	0,54	1,6	1,1
17	72,15	8,75	14,3	0,1	4,7	2	1,2
18	76	9	11,95	1,5	1,55	2,1	1,2
19	93,24	5,09	0,18	0,9	0,59	1,1	1,1
20	85,26	8,52	4,52	1,1	0,6	2,2	1,25
21	70	9,78	16,3	0,22	3,7	2,25	1,15
22	77,24	10,13	10,02	1,35	1,26	2,3	1,1
23	89,99	7,9	0,58	0,75	0,78	2,2	1,25
24	85,3	7,6	3,69	2,54	0,87	1,85	1,15
25	83,15	14,55	0,84	0,69	0,77	1,9	1,25
26	75,83	8,78	12,39	2,37	0,63	1,6	1,1
27	90	7,58	0,44	1,57	0,41	2,6	1,1
28	83,83	9,62	4,65	1,3	0,6	1,85	1,25
29	88,84	9	0,82	1,1	0,24	2,1	1,2
30	78,26	17,55	0,66	3,1	0,43	2,2	1,2
31	93,05	4	0,05	2,55	0,35	2,3	1,25
32	82,15	12,58	2,95	1,66	0,66	1,86	1,25
33	77,24	9,62	12,58	0,12	0,44	1,3	1,1
34	77,29	18,74	0,95	2,25	0,77	18,74	1,2

Таблица 4.3

Данные к задаче 3

№ варианта	Газ I	Газ II
1	коксовый	доменный
2	природный	доменный
3	природный	генераторный
4	коксовый	генераторный
5	коксовый	доменный
6	природный	доменный
7	природный	генераторный
8	коксовый	генераторный
9	коксовый	доменный
10	природный	доменный
11	природный	генераторный
12	коксовый	генераторный
13	коксовый	доменный
14	природный	доменный
15	природный	генераторный
16	коксовый	генераторный
17	коксовый	доменный
18	природный	доменный
19	природный	генераторный
20	коксовый	генераторный
21	коксовый	доменный
22	природный	доменный
23	природный	генераторный
24	коксовый	генераторный
25	коксовый	доменный
26	природный	доменный
27	природный	генераторный
28	коксовый	генераторный
29	коксовый	доменный
30	природный	доменный
31	природный	генераторный
32	коксовый	генераторный
33	коксовый	доменный
34	природный	доменный

Таблица 4.4

Данные к задаче 3

СОСТАВ ГАЗА ИНА СУХУЮ МАССУ в объем. %													
№ ва- рианта	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₂ H ₄	N ₂	H ₂ S	O ₂	W ^p г/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	61	20	10	4,5	0	0	0	0	1,5	1	0,5	1,5	15
2	0	95,0	0	1,2	1,1	0,57	0,24	0,41	0	1,48	0	0	0
3	0	78,9	0	1,2		7	2,1	0,35	0,5	6,35	3,6	0	5
4	51	24	12	5	0	0	0	0	0	2	2	4	45
5	59	22	9	5,5	0	0	0	0	1,5	1	0,5	1,5	32
6	0	68,4	0	2,2	2,46	1,3	0,7	0,2	0	23,0	1,7	0	0
7	0	85	0	0	4	1,5	2	0,5	0	3,4	3,6	0	10
8	54	21	13	4	0	0	0	0	0,5	1,5	2	4	45
9	60	20	11	5,5	0	0	0	0	0,5	1,5	0,5	1	22
10	0	82,9	0	1	5	2	1	1	0	4	3,1	0	0
11	0	78,1	0	1,3	6,85	0	1,5	0,45	0	11,3	0,5	0	10
12	55	21	12	3	0	0	0	0	0,5	2,5	2	4	44
13	53	22	13	4	0	0	0	0	0	2	2	4	27
14	0	70,5	0	0,9	7,2	2,1	0,35	0,65	0	18,3	0	0	0
15	0	97	0	0,5	0,7	0,32	0,2	0	0	1,3	0	0	5
16	60	25,2	6,3	2,6	0	0	0	0	2,35	3,1	0	0,5	23
17	57,3	25,7	6,44	1,91	0	0	0	0	3,02	4,9	0	0,7	15
18	0	74,3	0	4,59	8,6	3,2	1,68	0,67	0	6,1	0,8	0	5
19	0	96,2	0	1,2	0,4	0,5	0,8	0,2	0	0,7	0	0	9
20	59,2	24,5	6,8	3	0	0	0	0	2,9	2,9	0,5	0,2	77
21	61	25,6	5,7	2	0	0	0	0	2,3	2,8	0,6	0	22
22	0	80,5	0	3,2	5,08	4,6	2,05	0,78	0	3,2	0,5	0	0
23	0	94,3	0	0,9	1,2	1,2	0,25	0,38	0	1,8	0	0	10
24	55,8	27,9	5,84	2,65	0	0	0	0	2,49	2,8	0,9	1,5	58
25	59,2	24,5	6,8	3	0	0	0	0	2,9	2,9	0	0,7	29
26	0	86	0	4,67	2,39	2,1	1,29	0	0	3,1	0,5	0	0
27	0	90,6	0	2,51	2,1	0,55	0,87	0	0	2,9	0,5	0	9
28	56,83	26,42	8	2,4	0	0	0	0	2,03	2,9	0,8	0,62	22
29	61,58	26,9	4,3	2,72	0	0	0	0	1,5	1	0,5	1,5	25
30	0	69	0	4,5	5,1	2,35	0,94	0	0	18,1	0	0	3
31	0	82,6	0	0,33	8,95	2,31	3,24	1,27	0	1,84	0	0	0
32	53,64	28,6	6,87	4,5	0	0	0	0	3	1	0,98	1,41	10
33	61	24	6	3,65	0	0	0	0	2,35	1	0,5	1,5	65
34	0	88,5	0	4,5	0,5	0,25	0,2	0,1	0	5,45	0,5	0	0

Таблица 4.5

Данные к задаче 3

варианта	СОСТАВ ГАЗА ИНА СУХУЮ МАССУ в объем. %										W ^p , г/м ³	Q ^p _{см} , кДж/м ³	коэффициент избытка воздуха α
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₂ H ₄	N ₂	H ₂ S	O ₂			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	5	1,5	28	18	0	0	0	44,5	2,5	0,5	60	8,1	1,1
2	5,1	0,35	24,7	12,16	0	0	0	55,3	2,3	0,1	74	10,9	1,15
3	14	2,2	25	6,5	0	0	0,3	50,6	1,2	0,2	48	10,8	1,1
4	15	2,2	24	5,5	0	0	0,3	51,6	1,1	0,3	77	6,7	1,15
5	4,2	0,2	28,3	12,5	0	0	0	52,6	2	0,2	88	7,5	1,15
6	5,71	0,24	23,2	14,63	0	0	0	56,1	0	0,1	56	9,2	1,05
7	53,9	0,36	43,8	0,59	0	0	0	1,3	0	0	98	20,3	1,1
8	55,5	0,65	41,4	0,92	0	0	0	1,52	0	0	119	12,3	1,15
9	2,1	0,18	27,3	13,7	0	0	0	56,2	0,32	0,2	73	6,1	1,05
10	5,81	0,35	23,9	15,75	0	0	0	53,5	0,56	0,1	68	11,5	1,1
11	53,9	1,5	43,3	0,24	0	0	0	0,99	0	0	33	25,4	1,15
12	54,3	0,54	42,9	0,51	0	0	0	1,73	0	0	39	13,1	1,1
13	5,2	0,2	24,4	13,6	0	0	0	55,6	0,6	0,4	88	7,1	1,05
14	6,1	0,2	23,7	13,53	0	0	0	55,3	0,87	0,3	66	17,6	1,15
15	32,1	15,6	29,4	21,5	0	0	0	0,6	0,8	0	32	15,9	1,1
16	27,7	24,5	16,7	29	0	0	0,8	0,4	0,55	0,4	56	16,3	1,15
17	5,15	0,3	25	14,16	0	0	0	54,3	0,95	0,1	65	6,9	1,1
18	6,28	0,35	24,7	14,4	0	0	0	53,4	0,56	0,3	56	14,8	1,15
19	30,2	18,7	23,8	24,48	0,6	0	0	1,05	1,19	0	185	20,9	1,1
20	33,5	39,0	11,0	10,58	1,4	0,7	0	1,34	2,24	0	165	16,8	1,15
21	2,1	0,5	27,3	13,7	0	0	0	53,7	2,5	0,3	54	7,9	1,1
22	2,5	1,5	19	19,5	0	0	0	56,3	0,74	0,5	75	12,4	1,2
23	29,3	24,1	25,8	17,12	0,9	0,3	0	0,85	1,57	0	238	22,4	1,1
24	56	14,1	15,5	10,9	0,1	0	0	3	0,4	0	111	14,3	1,05
25	7	1,5	26	16	0	0	0	46,2	0,78	2,5	46	8,4	1,1
26	3	0,5	21	17	0	0	0	57,7	0,26	0,5	95	9,7	1,05
27	57,9	4	31,2	6,6	0	0	0	0,3	0	0	33	17,2	1,2
28	66	7	19,5	3	4,2	0,2	0	0	0	0	187	16	1,15
29	2,5	1,5	19	16,5	0	0	0	58,8	1,22	0,5	75	7,2	1,05
30	3	0,58	17,6	15,44	0	0	0	60,4	2,5	0,5	65	11	1,15
31	44,8	7,7	37	8,4	1,1	0	0	1	0	0	88	23,5	1,05
32	53,4	3,5	32,2	10	0,4	0	0	0,5	0	0	110	11,3	1,15
33	7,4	0,77	27,8	16,35	0	0	0	45,9	1,25	0,5	98	6	1,25
34	6,2	0,66	26,9	18,2	0	0	0	46,0	1,56	0,5	72	8,8	1,1

Таблица 4.6

Данные к задачам 1, 2, 3

№ варианта	Температура нагрева °С			Теплоемкость мазута, кДж/кг*К	Относительная влажность воздуха	Атмосферное давление, кПа	Парциальное давление водяного пара, мм.рт.ст.	Температура, поступающего из атмосферы воздуха, °С	Пиротехнический коэффициент
	газа	мазута	воздуха						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	300	80	500	1,45	0,6	96,5	9,21	10	0,8
2	250	85	400	1,4	0,65	97	9,84	11	0,75
3	350	75	450	1,35	0,7	97,5	10,52	12	0,85
4	200	80	550	1,5	0,75	98	11,23	13	0,9
5	450	100	500	1,45	0,8	98,5	11,99	14	0,95
6	250	70	350	1,4	0,85	99	12,79	15	0,75
7	250	65	350	1,35	0,9	99,5	13,63	16	0,8
8	500	75	600	1,5	0,95	100	14,53	17	0,85
9	550	90	650	1,45	0,9	100,5	15,48	18	0,9
10	350	60	400	1,4	0,85	101	16,48	19	0,95
11	350	60	400	1,35	0,8	101,3	17,54	20	0,75
12	450	65	450	1,5	0,75	101	18,65	21	0,8
13	300	80	350	1,45	0,7	100,5	19,83	22	0,85
14	250	80	450	1,4	0,65	100	21,07	23	0,9
15	300	75	550	1,35	0,6	99,5	22,38	24	0,95
16	350	85	450	1,5	0,55	99	23,76	25	0,75
17	350	60	550	1,25	0,5	98,5	25,21	26	0,8
18	250	75	550	1,4	0,55	98,4	26,74	27	0,85
19	400	85	550	1,35	0,6	98,3	28,35	28	0,9
20	450	70	550	1,5	0,65	98,2	30,04	29	0,95
21	500	50	600	1,25	0,7	98,1	31,82	30	0,75
22	250	85	400	1,4	0,75	98	33,7	31	0,8
23	350	80	450	1,35	0,8	97,5	35,66	32	0,85
24	350	75	550	1,5	0,85	97	37,73	33	0,9
25	400	100	500	1,45	0,9	96,5	35,66	32	0,95
26	350	85	450	1,4	0,95	96	33,7	31	0,75
27	250	70	450	1,35	0,9	96,5	31,82	30	0,8
28	500	70	600	1,4	0,85	97	30,04	29	0,85
29	550	95	600	1,45	0,8	97,5	28,35	28	0,9
30	350	85	400	1,4	0,75	98	26,74	27	0,95
31	250	65	350	1,35	0,7	98,5	25,21	26	0,75
32	350	70	500	1,5	0,65	99	23,76	25	0,8
33	250	55	450	1,25	0,7	99,5	22,38	24	0,85
34	250	80	450	1,4	0,75	100	21,07	23	0,9

4.2. Пример решения

Задача 1

Рассчитаем горение твердого топлива с элементным анализом на сухую массу:

Элементный состав на сухую массу, масс. %						W ^p , %	коэффициент избытка воздуха α
C	H	O	S	N			
95	2	1	1,5	0,5	4,5	1,45	

- 1) Определим необходимый объем кислорода на горение твердого топлива;
- 2) Определим состав и объем продуктов горения твердого топлива;
- 3) Определим калориметрическую температуру горения твердого топлива.

Для расчета используем следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха 1,45;
- относительная влажность воздуха 0,65;
- атмосферное давление 95 кПа;
- парциальное давление водяного пара 9,84 мм.рт. ст.;
- температура поступающего из атмосферы воздуха 11 °С;
- температура нагрева воздуха 400 °С;
- пиротехнический коэффициент 0,75.

- 1) Рассчитаем количество кислорода на горение твердого топлива.

Для расчета необходимо перевести состав с сухой на рабочую массу. Для этого воспользуемся следующим уравнением:

$$X_p = X^c \frac{(100 - W^p)}{100}$$

где W^p = 4,5 %. Тогда:

$$C^p = 95 \cdot (100 - 4,5) / 100 = 95 \cdot 0,955 = 90,73 \%$$

$$H^p = 2 \cdot 0,955 = 1,91 \%$$

$$N^p = 0,5 \cdot 0,955 = 0,48 \%$$

$$S^p = 1,5 \cdot 0,955 = 1,43 \%$$

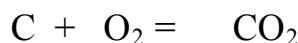
$$O^p = 1 \cdot 0,955 = 0,96 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Найдем количество кислорода, идущего на горение твердого топлива.

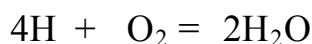
Расчёт ведем на 100 кг топлива. Горение топлива можно представить следующими реакциями:

$$90,73169,35169,35$$



$$12,0022,40$$

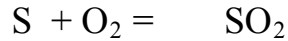
$$1,9110,721,39$$



$$4,00$$

$$22,40$$

1,431,001,00



32,0022,40

Количество кислорода, требуемого для сжигания 100 кг топлива:

$$V_{O_2} = 169,35 + 10,7 + 1,00 - 0,96 * 22,4 / 32 = 180,38 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг}$$

Количество азота поступающего на горение воздуха:

$$V_{N_2} = 180,38 * \frac{79}{21} = 678,59 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг}$$

Необходимое для полного сжигания твердого топлива количество воздуха составит

- теоретическое:

$$V_B^T = V_{O_2} + V_{N_2} = 180,38 + 678,59 = 858,97 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

- действительное:

$$V_B^D = V_B^T * \alpha = 858,97 * 1,45 = 1245,51 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг} = 12,46 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

$$\rho_{O_2} = M_{O_2} / 22,4 = 32 / 22,4 = 1,43 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{N_2} = 1,25 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{H_2O} = 0,80 \text{ кг/м}^3$$

Определяем количество и состав продуктов горения. Результаты расчетов представлены в табл. 3.7.

Таблица 4.7

Состав и количество продуктов горения твердого топлива, м³/100кг

Элемент	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	Σ
С	169,35					
Н		21,39				
С			1,00			
Н				0,38		
N ₂ из воздуха				678,59		
H ₂ O		5,6				
H ₂ O из воздуха		5,9				
α=1	169,35	32,89	1,00	678,97		882,21
α=1,45	169,35	35,54	1,00	984,33	81,17	1271,40
доли	0,1332	0,0280	0,0008	0,7742	0,0638	1,00

Воздух на горение поступает влажный. Влагосодержание рассчитывается по формуле:

$$X_{\text{возд}} = 0,622 * \varphi * P_{\text{нас}} / (B - \varphi * P_{\text{нас}}) =$$

$$= 0,622 * 0,65 * 9,84 * 133,3 / (97000 - 0,65 * 9,84 * 133,3) = 0,0055 \text{ кг/кг.}$$

Определим количество водяного пара, поступающего с воздухом на горение:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{возд}}} = x * V_{\text{в}}^{\text{T}} * 22,4 / M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01055 * 858,97 * 22,4 / 18 = 5,9 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

Объем избытка кислорода:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{изб}} = V_{\text{O}_2} * (\alpha_{\text{max}} - 1) = 180,38 * (1,45 - 1) = 81,17 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

Рассчитаем теплоту горения топлива по формуле Менделеева:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 0,339 * C^{\text{р}} + 1,03 * H^{\text{р}} - 0,109 * (O^{\text{р}} - S^{\text{р}}) - 0,0251 * W^{\text{р}} =$$

$$= 0,339 * 90,73 + 1,03 * 1,91 - 0,109 * (0,96 - 1,43) - 0,0251 * 4,5 = 32,66 \text{ МДж/кг.}$$

Начальная энтальпия продуктов горения составит:

$$I_{\text{нач}} = (Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{в}}) * 100 / V_{\text{пр}}^{\text{л}} = (32660 + 6627,09) * 100 / 1271,4 = 3090,23 \text{ кДж/кг.}$$

Физическая теплота, вносимая подогретым воздухом, определяется как:

$$Q_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{л}} * I_{400} = 12,46 * 532,08 = 6627,09 \text{ кДж/кг.}$$

Используя справочные данные, определим, при какой температуре продукты горения твердого топлива, приведенного в табл. 3.7. состава имеют начальную энтальпию, близкую к расчетной. Результаты вычислений представлены в табл. 3.8.

Таблица 4.8

Начальные энтальпии смеси продуктов горения твердого топлива при различных температурах

Компонент	Доли	$I_{1900},$ кДж/м ³	$Q, \text{ кДж/м}^3$
CO ₂ +SO ₂	0,1340	4634,76	621,02
H ₂ O	0,0280	3657,85	102,25
N ₂	0,7742	2808,22	2174,15
O ₂	0,0638	2971,3	189,70
		Σ	3087,12

Так как рассчитанное значение начальной энтальпии продуктов горения почти в точности соответствует табличному значению для $t=1900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, то калориметрическая (наивысшая) температура горения твердого

ТОПЛИВАСОСТАВИТ:

$$t_k = 1900 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Действительная температура горения:

$$t_d = t_k * \varphi = 1900 * 0,75 = 1425 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Задача 2

Рассчитаем горение мазута с элементным анализом на сухую массу:

Элементный состав на сухую массу, масс.%					W ^p , %	коэффициент избытка воздуха α
C	H	O	S	N		
82,6	10,4	5,3	0,9	0,8	1,9	1,1

- 1) Определим необходимый объем кислорода на горение мазута;
- 2) Определим состав и объем продуктов горения мазута;
- 3) Определим калориметрическую температуру горения мазута.

Для расчета используем следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха 1,1;
- относительная влажность воздуха 0,65
- атмосферное давление 95 кПа;
- парциальное давление водяного пара 9,84 мм. рт. ст.;
- температура поступающего из атмосферы воздуха 11 °С;
- температура нагрева воздуха 400°С;
- теплоемкость мазута 1,4 кДж/кг*К;
- температура нагрева мазута 85°С;
- пиротехнический коэффициент 0,75.

- 1) Рассчитаем количество кислорода на горение топлива.

Для расчета необходимо перевести состав с сухой на рабочую массу. Для этого воспользуемся следующим уравнением:

$$X^p = X^c(100 - W^p)/100.$$

$$W^p = 1,9\%, \text{ тогда:}$$

$$C^p = 82,6 \cdot (100 - 1,9) / 100 = 82,6 \cdot 0,981 = 81,03 \%$$

$$H^p = 10,4 \cdot 0,981 = 10,20 \%$$

$$N^p = 0,80 \cdot 0,981 = 0,78 \%$$

$$S^p = 0,90 \cdot 0,981 = 0,88 \%$$

$$O^p = 5,30 \cdot 0,981 = 5,20 \%$$

$$W^p = 1,90 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

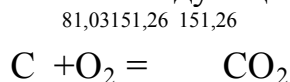
Рассчитаем теплоту горения мазута по формуле Менделеева:

$$Q_{\text{H}}^p = 0,339 \cdot C^p + 1,03 \cdot H^p - 0,109 \cdot (O^p - S^p) - 0,0251 \cdot W^p =$$

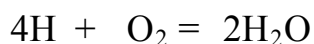
$$= 0,339 \cdot 81,03 + 1,03 \cdot 10,20 - 0,109 \cdot (5,20 - 0,88) - 0,0251 \cdot 1,9 = 37,46 \text{ МДж/кг}$$

Найдем количество кислорода, идущего на горение мазута. Расчет ведем на 100 кг топлива.

Горение мазута можно представить следующими реакциями:

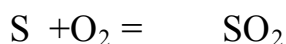


10,20 57,13 114,27



4,00 22,40

0,880,62 0,62



32,00 22,40

Количество кислорода, требуемого для сжигания 100 кг топлива:

$$V_{\text{O}_2} = 151,26 + 57,13 + 0,62 - 5,2 \cdot 22,4 / 32 = 205,37 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

Количество азота поступающего на горение воздуха:

$$V_{\text{N}_2} = 205,37 \cdot \frac{79}{21} = 772,58 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг}$$

Необходимое для полного сжигания мазута количество воздуха составит
- теоретическое:

$$V_{\text{B}}^{\text{T}} = V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} = 205,37 + 772,58 = 977,95 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

- действительное:

$$V_{\text{B}}^{\text{Д}} = V_{\text{B}}^{\text{T}} \cdot \alpha = 977,95 \cdot 1,1 = 1075,74 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг} = 10,76 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

$$\rho_{\text{O}_2} = M_{\text{O}_2} / 22,4 = 32 / 22,4 = 1,43 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{N}_2} = 1,25 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,80 \text{ кг/м}^3$$

2) Определяем количество и состав продуктов горения. Результаты расчетов представлены в табл. 3.9.

Таблица 4.9

Состав и количество продуктов горения мазута, м³/100кг

Элемент	Состав продуктов горения, м ³ /100кг					
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	Σ
С	151,26					
Н		114,27				
С			0,62			
Н				0,63		
N ₂ извоздуха				772,58		
H ₂ O		2,36				
H ₂ O из воздуха		6,71				
α=1	151,26	123,34	0,62	773,21		1048,43
α=1,15	151,26	124,02	0,62	850,46	20,54	1146,89
доли	0,1319	0,1081	0,0005	0,7415	0,018	1,00

Воздух на горение поступает влажный. Влагосодержание рассчитывается по формуле:

$$X_{\text{возд}} = 0,622 * \varphi * P_{\text{нас}} / (B - \varphi * P_{\text{нас}}) =$$

$$= 0,622 * 0,65 * 9,84 * 133,3 / (97000 - 0,65 * 9,84 * 133,3) = 0,0055 \text{ кг/кг}$$

Определим количество водяного пара, поступающего с воздухом на горение:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{возд}}} = x * V_{\text{в}}^T * 22,4 / M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0055 * 977,95 * 22,4 / 18 = 6,71 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

Объем избытка кислорода:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{изб}} = V_{\text{O}_2} * (\alpha_{\text{max}} - 1) = 205,37 * (1,1 - 1) = 20,54 \text{ м}^3 / 100 \text{ кг.}$$

3) Определим калориметрическую температуру горения мазута.

Начальная энтальпия продуктов горения составит:

$$I_{\text{нач}} = (Q_{\text{н}}^p + Q_{\text{в}} + Q_{\text{т}}) * 100 / V_{\text{пр}}^{\text{л}} = (37460 + 5723,81 + 119) * 100 / 1146,89 =$$

3775,64 кДж/кг.

Физическая теплота, вносимая подогретым воздухом, определяется как:

$$Q_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{л}} * I_{400} = 1075,74 * 532,08 = 5723,81 \text{ кДж/кг.}$$

Физическая теплота, вносимая подогретым топливом:

$$Q_{\text{т}} = c_{\text{т}} * t_{\text{т}} = 1,4 * 85 = 119 \text{ кДж/кг}$$

Используя справочные данные, определим, при какой температуре продукты горения, приведенного в табл. состава имеют начальную энтальпию, близкую к расчетной. Результаты вычислений представлены в табл.3.10 и 3.11.

Таблица 4.10

Начальные энтальпии смеси продуктов горения

Компонент	доли	I_{2200} , кДж/м ³	Q , кДж/м ³
CO ₂ +SO ₂	0,1324	5464,2	723,59
H ₂ O	0,1081	4358,83	471,33
N ₂	0,7415	3295,84	2443,99
O ₂	0,0179	3487,44	62,45
Σ		3701,35	

Таблица 4.11

Начальные энтальпии смеси продуктов горения

Компонент	доли	I_{2300} , кДж/м ³	Q кДж/м ³
CO ₂ +SO ₂	0,1324	5746,39	760,96
H ₂ O	0,1081	4485,34	485,01
N ₂	0,7415	3457,2	2563,65
O ₂	0,0179	3662,33	65,58
Σ		3875,19	

Калориметрическая (наивысшая) температура горения мазута составит:

$$t_k = t_m + \frac{(i_n - i_m)}{(i_b - i_m)} = 2200 + (3775,64 - 3701,35) / (3875,19 - 3701,35) * 100 = 2243^{\circ}\text{C}$$

Действительная температура горения:

$$t_d = t_k * \varphi = 2243 * 0,75 = 1682^{\circ}\text{C}$$

Задача 3

Рассчитаем горение смеси природного и коксового газа с теплотой сгорания с элементарным анализом на сухую массу:

Таблица 4.12

Состав природного газа на сухую массу

СОСТАВ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СУХУЮ МАССУ в объем.%												
H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₂ H ₄	N ₂	H ₂ S	O ₂	W ^p г/м ³
0	95,0	0	1,2	1,1	0,57	0,24	0,41	0	1,48	0	0	0

Таблица 4.13

Состав коксового газа на сухую массу

СОСТАВ КОКСОВОГО ГАЗА НА СУХУЮ МАССУ в объем.%										W ^p , г/м ³	Q ^p см, МДж/м ³	коэффициент избытка воздуха α
H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₂ H ₄	N ₂	H ₂ S	O ₂			
5,1	0,35	24,7	12,16	0	0	0	55,3	2,3	0,1	74	10,9	1,15

- 1) Определим необходимый объем кислорода на горение смеси природного и коксового газа;
- 2) Определим состав и объем продуктов горения смеси природного и коксового газа;
- 3) Определим калориметрическую температуру горения смеси природного и коксового газа.

Для расчета используем следующие данные:

- коэффициент избытка воздуха 1,15;
- относительная влажность воздуха 0,65
- атмосферное давление 95 кПа;
- парциальное давление водяного пара 9,84 мм.рт. ст.;
- температура поступающего из атмосферы воздуха 11 °С;
- температура нагрева воздуха 400°С;
- температура нагрева газа 250°С;
- пиротехнический коэффициент 0,75.

- 1) Определим необходимый объем кислорода на горение смеси природного и коксового газа.

Переведем состав сухих отопительных газов на рабочий. По формуле:

- для коксового газа: $X_{кг} = (100 - W_d^p * 0,1242) / 100 = (100 - 74 * 0,1242) / 100 = 0,9081$.

Тогда составы газов на рабочую массу будут:

Природный газ: Коксовый газ:

$C_4H_{10}^p = 0,24\%$;	$H_2^p = 4,68\%$;
$CH_4^p = 95,2\%$;	$CH_4^p = 0,27\%$;
$C_2H_6^p = 1,1\%$;	$CO^p = 22,43\%$;
$CO_2^p = 1,0\%$;	$CO_2^p = 11,04\%$;
$C_3H_8^p = 0,57\%$;	$N_2^p = 50,2\%$;
$N_2^p = 1,48\%$;	$O_2^p = 0,1\%$;
$C_5H_{12}^p = 0,41\%$;	$H_2S^p = 2,09\%$;
$W_{н.г.}^p = 0\%$	$W_{к.г.}^p = 9,19\%$.
Сумма 100 %	100 %

Рассчитаем теплоту сгорания газов:

$$Q_H^p = 0,01 * (\%H_2^p * Q_{H_2}^p + \%CH_4^p * Q_{CH_4}^p + \%CO^p * Q_{CO}^p + \%C_2H_6^p * Q_{C_2H_6}^p + \%C_3H_8^p * Q_{C_3H_8}^p + \%H_2S^p * Q_{H_2S}^p + \%C_4H_{10}^p * Q_{C_4H_{10}}^p + \%C_5H_{12}^p * Q_{C_5H_{12}}^p),$$

где $\%H_2^p$, $\%C_3H_8^p$, $\%C_4H_{10}^p$, $\%C_5H_{12}^p$, $\%CH_4^p$, $\%CO^p$, $\%C_2H_6^p$, $\%H_2S^p$ – процентный состав горючих компонентов;

$Q_{H_2}^p$, $Q_{CH_4}^p$, Q_{CO}^p , $Q_{C_2H_6}^p$, $Q_{C_5H_{12}}^p$, $Q_{C_4H_{10}}^p$, $Q_{C_3H_8}^p$, $Q_{H_2S}^p$ – низшие теплоты сгорания чистых компонентов смеси, ккал/м³.

$$Q_{н.г.}^p = 0,01 * (95,2 * 8558 + 1,1 * 15235 + 0,57 * 21802 + 0,24 * 28345 + 0,41 * 34900) * 4,187 = 36218,35 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_{к.г.}^p = 0,01 * (4,68 * 2577 + 0,27 * 8558 + 22,43 * 3016 + 2,09 * 5534) * 4,187 = 3918,62 \text{ кДж/м}^3.$$

Найдём доли каждого газа в смеси:

$$a_{н.г.} = (3918,62 - 10900) / (3918,62 - 36218,35) = 0,216;$$

$$a_{к.г.} = 1 - a_{н.г.} = 0,784$$

Составим смесь газов по методу аддитивности:

$$H_{2см}^p = 4,68 * 0,784 = 3,67\%;$$

$$CH_{4см}^p = 95,2 * 0,216 + 0,27 * 0,784 = 20,79\%;$$

$$\text{CO}_{\text{см}}^P = 22,43 * 0,784 = 17,58\%;$$

$$\text{CO}_{2\text{см}}^P = 1,0 * 0,216 + 11,04 * 0,784 = 8,87\%;$$

$$\text{C}_2\text{H} = 1,1 * 0,216 = 0,24\%;$$

$$\text{N}_{2\text{см}}^P = 1,48 * 0,216 + 50,2 * 0,784 = 39,67\%;$$

$$\text{H}_2\text{S}_{\text{см}}^P = 2,09 * 0,784 = 1,64\%;$$

$$\text{O}_{2\text{см}}^P = 0,1 * 0,784 = 0,08\%;$$

$$\text{C}_3\text{H} = 0,57 * 0,216 = 0,12\%;$$

$$\text{C}_4\text{H} = 0,24 * 0,216 = 0,05\%;$$

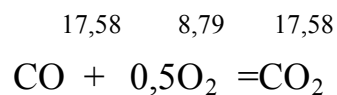
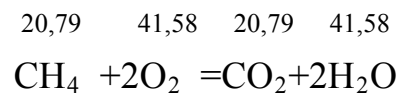
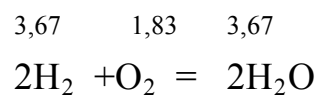
$$\text{C}_5\text{H} = 0,41 * 0,216 = 0,09\%;$$

$$\text{W}_{\text{см}}^P = 9,19 * 0,784 = 7,20\%.$$

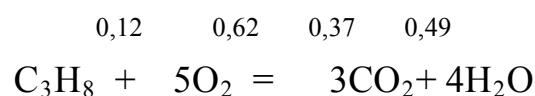
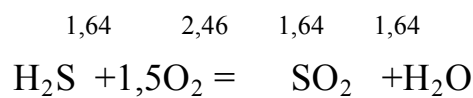
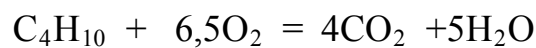
Найдем количество кислорода, пошедшего на горение смеси.

Расчёт будем вести на 100 м³ смеси.

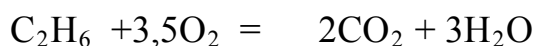
Записываем уравнения горения топлива:



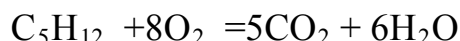
$$0,05 \quad 0,34 \quad 0,21 \quad 0,26$$



$$0,24 \quad 0,83 \quad 0,48 \quad 0,71$$



$$0,09 \quad 0,71 \quad 0,44 \quad 0,53$$



Тогда количество кислорода, пошедшего на горение смеси:

$$V_{O_2} = 1,83 + 41,58 + 8,79 + 0,34 + 2,46 + 0,62 + 0,83 + 0,71 - 0,08 * 22,4 / 32 = 57,1 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3$$

Найдем количество азота, считая, что воздух состоит на 79% из азота и 21% кислорода.

$$V_{N_2} = 57,1 * \frac{79}{21} = 214,8 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3$$

Тогда количество воздуха теоретическое:

$$V_0^T = V_{O_2} + V_{N_2} = 57,1 + 214,8 = 271,9 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3$$

и действительное:

$$V_0^A = V_0^T * \alpha = 271,9 * 1,15 = 312,69 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3 = 3,13 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Найдем влагосодержание воздуха $x_{\text{возд}}$ по формуле:

$$x_{\text{возд}} = 0,622 * \varphi * P_{\text{нас}} / (B - \varphi * P_{\text{нас}}) = 0,622 * 0,65 * 9,84 * 133,3 / (97000 - 0,65 * 9,84 * 133,3) = 0,0047 \text{ кг/кг}$$

Определим, какое количество водяного пара ($\text{м}^3 / 100 \text{ м}^3$) поступает с воздухом в процесс горения:

$$V_{H_2O_{\text{возд}}} = x * V_0^T * 22,4 / M_{H_2O}$$

где 22,4 – мольный объём при нормальных условиях, $\text{м}^3 / \text{кмоль}$;

M_{H_2O} – молекулярная масса воды, кг/кмоль .

$$V_{H_2O_{\text{возд}}} = 0,0047 * 271,9 * 22,4 / 18 = 1,57 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

2) Определим состав и объём продуктов горения смеси природного и доменного газа.

Определим количество состав продуктов сгорания. Для этого заполним таблицу 3 продуктов горения, $\text{м}^3 / 100 \text{ м}^3$.

Избыточное количество кислорода определяется по формуле:

$$V_{O_2}^{\text{изб}} = V_{O_2} * (\alpha_{\text{max}} - 1) = 57,1 * (1,15 - 1) = 8,56 \text{ м}^3 / 100 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем энтальпию смеси по формуле:

$$I_{\text{отоп}} = 0,01 * (I_{H_2} * H_2^p + I_{CH_4} * CH_4^p + I_{CO} * CO_{\text{см}}^p + I_{CO_2} * CO_{2\text{см}}^p + I_{C_5H_{12}} * C_5H_{12}^p)$$

$$C_5H_{12_{\text{см}}}^p + I_{N_2} * N_{2_{\text{см}}}^p + I_{H_2S} * H_2S_{\text{см}}^p + I_{O_2} * O_2^p + I_{H_2O} * H_2O + I_{C_2H_6} * C_2H_{6_{\text{см}}}^p + I_{C_3H_8} * C_3H_{8_{\text{см}}}^p + I_{C_4H_{10}} * C_4H_{10_{\text{см}}}^p) = 0,01 * (3,67 * 325,12 + 20,79 * 460,57 + 17,58 * 328,89 + 8,87 * 462,96 + 0,09 * 1,7 * 2,623 * 250 + 39,67 * 326,51 + 1,64 * 398,6 + 0,08 * 337,43 + 7,2 * 382,415 + 0,24 * 0,708 * 2,68 * 250 + 0,12 * 1,04 * 2,646 * 250 + 0,05 * 1,37 * 2,635 * 250) = 373,86 \text{ кДж/м}^3$$

В справочнике находим теплоёмкость и плотность газов при 25° С.

$$C_p_{C_2H_6} = 2,680 \text{ кДж/кг*К}$$

$$\rho_{C_2H_6} = 0,708 \text{ кг/м}^3$$

$$C_p_{C_3H_8} = 2,646 \text{ кДж/кг*К}$$

$$\rho_{C_3H_8} = 1,04 \text{ кг/м}^3$$

$$C_p_{C_4H_{10}} = 2,635 \text{ кДж/кг*К}$$

$$\rho_{C_4H_{10}} = 1,37 \text{ кг/м}^3$$

$$C_p_{C_5H_{12}} = 2,623 \text{ кДж/кг*К}$$

$$\rho_{C_5H_{12}} = 1,7 \text{ кг/м}^3$$

Таблица 4.14

Состав и количество продуктов сгорания

Компоненты смеси	Количество о, %	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	Σ
H ₂	3,67		3,67				
CH ₄	20,79	20,79	41,58				
CO	17,58	17,58					
CO ₂	8,87	8,87					
C ₂ H ₆	0,24	0,48	0,71				
C ₃ H ₈	0,12	0,37	0,49				
C ₄ H ₁₀	0,05	0,21	0,26				
N ₂	39,67				39,67		
N ₂ из воздуха					214,80		
H ₂ S	1,64		1,64	1,64			
H ₂ O	7,20		7,20				
H ₂ O из воздуха			1,57				
α=	1,00	48,30	57,13	1,64	254,47		361,53
α=	1,15	48,30	57,36	1,64	286,69	8,56	402,56
Доли a1		0,1200	0,1425	0,0041	0,7122	0,0213	1,00

Количество продуктов сгорания $V_{\text{пр.г}} = 4,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$

3) Определим калориметрическую температуру горения смеси природного и доменного газа.

Определим физическое тепло подогретого воздуха:

$$Q_B = V_B^A * I_{400} = 3,13 * 532,08 = 1663,76 \text{ кДж/м}^3$$

Рассчитаем начальную энтальпию продуктов сгорания:

$$I_{\text{нач}} = \left(\frac{Q_{\text{см}}^p + Q_B + Q_T}{V_{\text{пр}}^A} \right) = (10900 + 1663,76 + 373,86) * 100 / 403 =$$

$$= 3213,87 \text{ кДж/м}^3. \text{Находим энтальпию продуктов сгорания при}$$

температурах 1900 и 2000 °С

Таблица 4.15

Энтальпия продуктов сгорания

Компонент	доли	$I_{1900}, \text{ кДж/м}^3$	$Q \text{ кДж/м}^3$
CO ₂ +SO ₂	0,1240	4634,76	574,90
H ₂ O	0,1425	3657,85	521,23
N ₂	0,7122	2808,22	1999,97
O ₂	0,0213	3314,85	70,53
		Σ	3166,64

Таблица 4.15

Энтальпия продуктов сгорания

Компонент	доли	$I_{2000}, \text{ кДж/м}^3$	$Q \text{ кДж/м}^3$
CO ₂ +SO ₂	0,1240	4910,51	609,11
H ₂ O	0,1425	3889,72	554,27
N ₂	0,7122	2970,25	2115,37
O ₂	0,0213	3142,76	66,87
		Σ	3345,62

Калориметрическая температура горения топлива:

$$t_k = t_M + \left(\frac{I_H - I_M}{I_B - I_M} \right) = 1900 + (3213,87 - 3166,64) / (3345,62 - 3166,64) * 100$$

$$= 1926 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Действительная температура горения смеси газов:

$$t_D = t_k * \varphi = 1926 * 0,75 = 1445 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пинтя Т. Н. Техническая термодинамика: конспект лекций [Электронный ресурс]: учебное пособие / Т. Н. Пинтя. - Магнитогорск: МГТУ, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Пинтя Т. Н. Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие / Т. Н. Пинтя; МГТУ. - Магнитогорск, 2008. - 65 с.: ил., табл.
3. Теплотехника [Текст]: учебник / [А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт и др.]; под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 325 с.: ил., диагр., схемы, табл. + 1 вкл. с диагр. водян. пара.
4. Теплотехника [Текст]: учебник / [В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др.]; под ред. В. Н. Луканина. - 6-е изд., стер. - М.: Высшая школа, 2008. - 671 с.: ил.
5. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст]: учебное пособие / [Л. Т. Бахшиева, Б. П. Кондауров, А. А. Захарова, В. С. Салтыкова]; под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.: ил., схемы, табл. - (Высшее проф. образование: Химическая технология).
6. Смирнов, А.Н. Лабораторный практикум по физической химии: [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / А.Н. Смирнов, Н.Ю. Свечникова, С.В. Юдина, Э.В. Дюльдина; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». - Электрон.текстовые дан. (3,9 Мб). - Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2017. - 1 электрон. опт. диск (CDR). - Систем. требования: IBM PC, любой, более 1 GHz; 512 Мб RAM; 10 Мб HDD; MS Windows XP и выше; Adobe Reader 8.0 и выше; CD/DVD-ROM дисковод; мышь. - Загл. с титул. экрана.
7. Дюльдина, Э. В. Физическая химия [Текст]: учебное пособие / [Э. В. Дюльдина, С. П. Ключковский, Н. Ю. Свечникова и др.]; МГТУ. - Магнитогорск, 2012. - 128 с.: ил., диагр., граф., табл.
8. Дюльдина, Э. В. Практические и контрольные работы по физической химии [Электронный ресурс]: учебное пособие / [Э. В. Дюльдина, С. П. Ключковский, Н. Ю. Свечникова и др.]; МГТУ. - Магнитогорск: МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Дюльдина, Э. В. Химическая кинетика и адсорбция [Электронный ресурс]: метод. указания для студентов по дисциплине "Физическая химия" / [Э. В. Дюльдина, С. П. Ключковский, Н. Ю. Свечникова и др.]; МГТУ. - Магнитогорск: МГТУ, 2013. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
10. Смирнов, А. Н. Физическая химия. Раздел: Химическая кинетика [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Н. Смирнов, Н. Ю. Свечникова, С. В. Юдина, Э. В. Дюльдина; МГТУ. - Магнитогорск: МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Физико-химические свойства воздуха

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг* К)	Теплопроводность, Вт/(м* К)	Кинематическая вязкость, (м ² /с) x 10 ⁻⁶
-150	2,793	1,026	0,0116	3,08
-100	1,980	1,009	0,0160	5,95
-50	1,534	1,005	0,0204	9,55
0	1,293	1,005	0,0243	13,30
20	1,205	1,005	0,0257	15,11
40	1,127	1,005	0,0271	16,97
60	1,067	1,009	0,0285	18,90
80	1,000	1,009	0,0299	20,94
100	0,946	1,009	0,0314	23,06

Таблица 2

Низшая теплота сгорания чистых газов

Газ	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ S
Q ^p _{низш} , ккал/м ³	3016	2577	8558	14105	15235	21802	28345	34900	5534

Таблица 3

Энтальпия 1 м³ воздуха и газов (кДж/м³) при различных температурах и постоянном давлении 101,3 кПа

t, °C	воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₄
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100	130,51	172,00	150,18	130,13	131,93	130,21	128,96	154,08	165,39	210,61
200	261,94	361,67	303,47	260,60	267,38	262,10	259,59	314,86	353,38	465,59
300	395,42	564,24	461,36	392,41	407,48	395,67	390,65	482,34	567,75	758,68
400	532,08	777,44	523,69	526,89	551,85	632,58	520,86	658,19	808,93	1088,62
500	672,01	1001,78	791,55	664,58	700,17	672,01	653,17	841,59	984,78	1446,61
600	814,96	1236,76	964,68	805,06	851,64	816,46	786,41	1032,51	1071,84	1828,88
700	960,75	1475,41	113,64	940,36	1005,24	961,33	920,30	1230,98	1667,68	2233,35
800	1109,05	1718,95	1328,11	1094,65	1162,32	1112,06	1055,12	1436,98	1996,36	2672,98
900	1259,36	1972,43	1517,87	1243,55	1319,67	1262,38	1190,78	1646,75	2336,35	3105,08
1000	1411,86	2226,75	1713,32	1393,86	1480,11	1415,20	1327,28	1863,21	2696,43	3567,32
1100	1565,94	2485,3	1913,67	1546,14	1641,02	1570,54	1469,22	2081,77	3062,79	
1200	1721,36	2746,44	2118,78	1699,76	1802,76	1728,39	1612,86	2306,20	3446,74	
1300	1879,27	3010,58	2328,01	1857,74	1966,05	1883,31	1758,12	2531,04		
1400	2036,87	3276,75	2540,25	2012,36	2129,93	2045,76	1905,08	2760,91		
1500	2196,19	3545,34	2758,39	2170,55	2296,78	2200,26	2011,85	2995,80		
1600	2356,68	3815,86	2979,13	2328,65	2463,97	2364,82	2204,04			
1700	2517,60	4087,10	3203,05	2486,28	2632,09	2526,85	2356,02			
1800	2680,01	4360,67	3429,90	2646,74	2800,48	2690,56	2509,69			

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1900	2841,43	4634,76	3657,85	2808,22	2971,30	2848,00	2657,07			
2000	3006,26	4910,51	3889,72	2970,25	3142,76	3014,64	2813,66			
2100	3169,77	5186,81	4121,79	3131,96	3314,85	3174,16	2971,93			
2200	3338,21	5464,20	4358,83	3295,84	3487,44	3343,73	3131,88			
2300	3500,54	5746,39	4485,34	3457,20	3662,33	3505,36	3293,49			
2400	3665,80	6023,25	4724,37	3620,58	3837,64	3666,82	3456,79			
2500	3835,29	6303,53	5076,74	3786,09	4014,29	3840,58	3620,76			

Учебное текстовое электронное издание

**Свечникова Наталья Юрьевна
Юдина Светлана Владимировна
Горохов Алексей Вячеславович**

**ПРАКТИКУМ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ
И ТЕПЛОТЕХНИКЕ**

Практикум

1,20 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2018 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра физической химии и химической технологии
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru