

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. А.А.УГАРОВА**

(филиал) Федерального государственного автономного образовательного
Учреждения высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Кафедра металлургии и металловедения им. С. П. Угаровой

Федина В.В.

ТЕПЛОТЕХНИКА

**Методические указания по выполнению домашнего задания
для студентов, обучающихся по направлению
«Горное дело»**

Одобрено редакционно–издательским советом института

Старый Оскол
2015г.

УДК 536.07

ББК 31.3

Рецензент: к.т.н., доц. А.С. Тимофеева

В.В. Федина Теплотехника. Методические указания к выполнению домашнего задания.

Старый Оскол СТИ МИСиС, 2015, 65 с.

Методические указания предназначены для оказания помощи студентам всех форм обучения при выполнении домашнего задания по курсу «Теплотехника». В пособии представлены задачи по данной дисциплине, дается краткое теоретическое введение, представлены основные формулы, необходимые для решения задач, приведены примеры решений. В учебном пособии дается два домашних задания. Составлено в соответствии с утвержденной программой дисциплины «Теплотехника».

© СТИ НИТУ МИСиС

© Федина В.В.

Предисловие

Настоящее пособие по изучению курса «Теплотехника» предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Горное дело» всех видов обучения. В данном пособии краткие теоретические сведения, примеры выполнения домашнего задания и домашние задания.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении высшей математики, физики, химии.

Знания, полученные при изучении данной дисциплины, используются в специальных курсах: «Горные машины и оборудование», «Дробление, измельчение и подготовка руд к обогащению/Обогатительное производство», а также при выполнении выпускных квалификационных работ.

Цели изучения дисциплины «Гидромеханика» заключаются в формировании знаний в области динамики смешивания материалов в аппаратах технологических схем обогащения, сепарационных процессов в схемах обогащения руд.

Задачи изучения дисциплины определяются её местом в учебном плане подготовки бакалавров и формируются на основе требования к профессиональным знаниям, умениям и навыкам, которыми должны владеть студенты.

В процессе выполнения курсовой работы по курсу «Гидромеханика» студенты овладевают следующими компетенциями:

- способностью к обобщению и анализу информации, постановке целей и выбору путей их достижения (ОК-1);
- умением логически последовательно, аргументировано и ясно излагать мысли, правильно строить устную и письменную речь (ОК-3);
- способностью к поиску правильных технических и организационно-управленческих решений и нести за них ответственность (ОК-6);
- демонстрировать пользование компьютером как средством управления и обработки информационных массивов (ПК-4);

Домашнее задание № 1
Техническая термодинамика
Расчёт обратимого термодинамического цикла
на идеальном газе

Цель выполнения домашнего задания:

Освоить современные методы расчёта термодинамических циклов на идеальном газе.

Изучить методики расчёта средней теплоёмкости при постоянном давлении и объёме по процессу. Освоить методики расчёта линейной и нелинейной интерполяции теплоёмкости по температуре.

Научиться рассчитывать термодинамические параметры точек цикла, энергетических характеристик цикла. Изучить методы расчёта работы, совершённой газом, тепла, поступающего к рабочему веществу.

Научиться рассчитывать коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины. Уметь сравнивать коэффициенты полезного действия заданного цикла и идеального цикла Карно.

Научиться строить диаграммы процессов в различных координатах.

Освоить методы сравнения эффективности цикла в различных диаграммах.

Освоить методы исследования эффективности термодинамического цикла в зависимости параметров проведения процесса.

Краткие теоретические сведения

Термодинамика изучает законы превращения энергии в различных процессах, происходящих в макроскопических системах и сопровождающихся тепловыми эффектами.

Техническая термодинамика изучает закономерности взаимного превращения тепловой и механической энергии и свойства тел, участвующих в этих превращениях.

Термодинамическая система представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействиях друг с другом и с окружающими систему внешними телами («внешней средой»).

Выбор системы произволен и диктуется условиями решаемой задачи. Тела, не входящие в систему, называют *о к р у ж а ю щ е й с р е д о й*. Систему отделяют от окружающей среды контрольной поверхностью (оболочкой).

Механическое и тепловое взаимодействия термодинамической системы осуществляются через контрольные поверхности. При механическом взаимодействии самой системой или над системой совершается работа. Тепловое взаимодействие заключается в переходе теплоты между отдельными телами системы и между системой и окружающей средой.

В самом общем случае система может обмениваться со средой и веществом (массообменное взаимодействие). Такая система называется *о т к р ы т о й*. Потоки газа или пара в турбинах и трубопроводах — примеры открытых систем. Если вещество не проходит через границы системы, то она называется *з а к р ы т о й*. В дальнейшем, если

это специально не оговаривается, мы будем рассматривать закрытые системы.

Термодинамическую систему, которая не может обмениваться теплотой с окружающей средой, называют теплоизолированной или адиабатной. Примером адиабатной системы является газ, находящийся в сосуде, стенки которого покрыты идеальной тепловой изоляцией, исключаяющей теплообмен между заключенным в сосуде газом и окружающими телами. Такую изоляционную оболочку называют адиабатной. Система, не обменивающаяся с внешней средой ни энергией, ни веществом, называется изолированной (или замкнутой).

Простейшей термодинамической системой является рабочее тело, осуществляющее взаимное превращение теплоты и работы. В двигателе внутреннего сгорания, например, рабочим телом является приготовленная в карбюраторе горючая смесь, состоящая из воздуха и паров бензина.

Свойства каждой системы характеризуются рядом величин, которые принято называть термодинамическими параметрами.

Давление обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью и численно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к последней.

В Международной системе единиц (СИ) давление выражается в паскалях

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Поскольку эта единица мала, удобнее использовать

$$1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па} \text{ и } 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}.$$

Давление измеряется при помощи манометров, барометров и вакуумметров.

Жидкостные и пружинные манометры измеряют избыточное давление, представляющее собой разность между полным или абсолютным давлением p измеряемой среды и атмосферным давлением $p_{\text{атм}}$, т.е.

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{атм}} - p$$

Приборы для измерения давлений ниже атмосферного называются вакуумметрами; их показания дают значение разрежения (или вакуума):

$$P_{\text{в}} = P_{\text{атм}} - p,$$

т. е. избыток атмосферного давления над абсолютным.

Следует отметить, что параметром состояния является абсолютное давление. Именно оно входит в термодинамические уравнения.

Температурой называется физическая величина, характеризующая степень нагретости тела.

В системе СИ единицей температуры является кельвин (К); на практике широко применяется градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Соотношение между абсолютной T и стоградусной t температурами имеет вид

$$T = t + 273,15.$$

Удельный объем v — это объем единицы массы вещества. Если однородное тело массой M занимает объем V , то по определению

$$v = V/M.$$

В системе СИ единица удельного объема $1 \text{ м}^3/\text{кг}$. Между удельным объемом вещества и его плотностью существует очевидное соотношение:

$$v = \frac{1}{\rho}$$

Для сравнения величин, характеризующих системы в одинаковых состояниях, вводится понятие «нормальные физические условия»:

$$p=760 \text{ мм рт.ст.} = 101,325 \text{ кПа}; T=273,15 \text{ К.}$$

В разных отраслях техники и разных странах вводят свои, несколько отличные от приведенных «нормальные условия», например, «технические» ($p = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 98 \text{ кПа}$, $t=15^\circ\text{C}$) или нормальные условия для оценки производительности компрессоров ($p = 101,325 \text{ кПа}$, $t = 20^\circ\text{C}$) и т. д.

Опыт показывает, что удельный объем, температура и давление простейших систем, которыми являются газы, пары или жидкости, связаны термическим уравнением состояния вида $f(p, v, T) = 0$.

Уравнение состояния для произвольной массы газа M :

$$pV = MRT. \quad (1)$$

Уравнению Клапейрона можно придать универсальную форму, если отнести газовую постоянную к 1 кмолью газа, т. е. к количеству газа, масса которого в килограммах численно равна молекулярной массе μ . Положив в (1) $M = \mu$ и $V = V \mu$, получим для одного моля уравнение Клапейрона - Менделеева:

$$pV_\mu = \mu RT.$$

Здесь V_μ - объем киломоля газа, а μR - универсальная газовая постоянная.

В *реальных газах* в отличие от идеальных существенны силы межмолекулярных взаимодействий (силы притяжения, когда молекулы находятся на значительном расстоянии, и силы отталкивания при достаточном сближении их друг с

другом) и нельзя пренебречь собственным объемом молекул.

Наличие межмолекулярных сил отталкивания приводит к тому, что молекулы могут сближаться между собой только до некоторого минимального расстояния. Поэтому можно считать, что свободный для движения молекул объем будет равен $v - b$, где b - тот наименьший объем, до которого можно сжать газ. В соответствии с этим длина свободного пробега молекул уменьшается и число ударов о стенку в единицу времени, а, следовательно, и давление увеличивается по сравнению с идеальным газом в отношении $v/(v - b)$, т. е.

$$p = \frac{RT}{v} \frac{v}{v - b} = \frac{RT}{v - b}.$$

Силы притяжения действуют в том же направлении, что и внешнее давление, и приводят к возникновению молекулярного (или внутреннего) давления. Сила молекулярного притяжения каких-либо двух малых частей газа пропорциональна произведению числа молекул в каждой из этих частей, т. е. квадрату плотности, поэтому молекулярное давление обратно пропорционально квадрату удельного объема газа: $p_{\text{мол}} = a/v^2$, где a - коэффициент пропорциональности, зависящий от природы газа. Отсюда получаем уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.):

$$p + a/v^2 = RT/(v - b),$$

или

$$(p + a/v^2)(v - b) = RT.$$

При больших удельных объемах и сравнительно невысоких давлениях реального газа уравнение Ван-дер-Ваальса практически вырождается в уравнение состояния идеального газа Клапейрона, ибо величина a/v^2 (по сравне-

нию с p) и b (по сравнению с v) становятся пренебрежимо малыми.

Изменение состояния термодинамической системы во времени называется термодинамическим процессом. Так, при перемещении поршня в цилиндре объём, а с ним давление и температура находящегося внутри газа будут изменяться, будет совершаться процесс расширения или сжатия газа.

Теплоемкость газов

Отношение количества теплоты δQ , полученного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к связанному с этим изменению температуры тела dT , называется теплоемкостью тела в данном процессе:

$$C = \delta Q / dT .$$

Обычно теплоемкость относят к единице количества вещества и в зависимости от выбранной единицы различают:

удельную массовую теплоемкость c , отнесенную к 1 кг газа, Дж/(кг·К);

удельную объемную теплоемкость c' , отнесенную к количеству газа, содержащегося в 1 м³ объема при нормальных физических условиях, Дж/(м³·К);

удельную мольную теплоемкость μc , отнесенную к одному киломолю, Дж/(кмоль·К).

Зависимость между удельными теплоемкостями устанавливается очевидными соотношениями:

$$c = \mu c / \mu ; c' = c \rho_n ,$$

где ρ_n - плотность газа при нормальных условиях.

Изменение температуры тела при одном и том же количестве сообщаемой теплоты зависит от характера происходящего при этом процесса, поэтому *теплоемкость являет-*

ся функцией процесса. Это означает, что одно и то же рабочее тело в зависимости от процесса требует для своего нагревания на 1 К различного количества теплоты. Численно величина c изменяется в пределах от $+\infty$ до $-\infty$.

В термодинамических расчетах большое значение имеют:

теплоемкость при постоянном давлении

$$c_p = \delta q_p / dT,$$

равная отношению количества теплоты δq_p , сообщенной телу в процессе при постоянном давлении, к изменению температуры тела dT

теплоемкость при постоянном объеме

$$c_v = \delta q_v / dT, \quad (2)$$

равная отношению количества теплоты, подведенной к телу в процессе при постоянном объеме, к изменению температуры тела.

В соответствии с первым законом термодинамики для закрытых систем, в которых протекают равновесные процессы

$$\delta q = (du + p dv), \text{ и}$$

$$\delta q = (\partial u / \partial T)_v dT + [(\partial u / \partial v)_T + p] dv.$$

Для изохорного процесса ($v = \text{const}$) это уравнение принимает вид

$$\delta q_v = (\partial u / \partial T)_v dT,$$

и, учитывая (2), получаем, что

$$c_v = (\partial u / \partial T)_v,$$

т. е. теплоемкость тела при постоянном объеме равна частной производной от его внутренней энергии по температуре и характеризует темп роста внутренней энергии в изохорном процессе с увеличением температуры.

Для идеального газа $c_v = \partial u / \partial T$

Для изобарного процесса ($p = \text{const}$) получаем

$$c_p = (\partial u / \partial T)_v + [(\partial u / \partial v)_T + p](dv/dT)_p$$

или

$$c_p = c_v + [(\partial u / \partial v)_T + p](dv/dT)_p$$

Это уравнение показывает связь между теплоемкостями c_p и c_v . Для идеального газа оно значительно упрощается. Действительно, внутренняя энергия идеального газа определяется только его температурой и не зависит от объема, поэтому $(\partial u / \partial v)_T = 0$ и, кроме того, из уравнения состояния следует $p(dv/dT)_p = R$, откуда

$$c_p = c_v + R.$$

Это соотношение называется уравнением Майера и является одним из основных в технической термодинамике идеальных газов.

В процессе $v = \text{const}$ теплота, сообщаемая газу, идет лишь на изменение его внутренней энергии, тогда как в процессе $p = \text{const}$ теплота расходуется и на увеличение внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. Поэтому c_p больше c_v на величину этой работы.

Для реальных газов $c_p - c_v > R$, поскольку при их расширении (при $p = \text{const}$) совершается работа не только против внешних сил, но и против сил притяжения, действующих между молекулами, что вызывает дополнительный расход теплоты.

Обычно теплоемкости определяются экспериментально, но для многих веществ их можно рассчитать методами статистической физики.

Числовое значение теплоемкости идеального газа позволяет найти классическая теория теплоемкости, основанная на теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул. Молекула одноатомного газа

имеет три степени свободы соответственно трем составляющим в направлении координатных осей, на которые может быть разложено поступательное движение. Молекула двухатомного газа имеет пять степеней свободы, так как помимо поступательного движения она может вращаться около двух осей, перпендикулярных линии, соединяющей атомы (энергия вращения вокруг оси, соединяющей атомы, равна нулю, если атомы считать точками). Молекула трехатомного и вообще многоатомного газа имеет шесть степеней свободы: три поступательных и три вращательных.

Поскольку для идеального газа $\mu c_v = dU_{\mu}/dT = \frac{1}{2} i \mu R$,

то молярные теплоемкости одно-, двух- и многоатомных газов равны соответственно:

$$\mu c_v = \frac{3}{2} \mu R = 12,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кмольК}}; \mu c_v = \frac{5}{2} \mu R = 20,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмольК}};$$

$$\mu c_v = \frac{6}{2} \mu R = 24,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кмольК}}.$$

Теплоемкость реального газа зависит от давления, правда, очень слабо.

Поскольку теплоемкость реального газа зависит от температуры, в термодинамике различают истинную и среднюю теплоемкости.

Средней теплоемкостью $c_{\text{ср}}$ данного процесса в интервале температур от t_1 до t_2 называется отношение количества теплоты, сообщаемой газу, к разности конечной и начальной температур:

$$c_{\text{ср}} \Big|_{t_1}^{t_2} = q / (t_2 - t_1)$$

Выражение

$$c = \delta q / dT \tag{3}$$

определяет теплоемкость при данной температуре или так называемую истинную теплоемкость. Из (3) следует, что

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt$$

поэтому

$$c_{\text{cp}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt / (t_2 - t_1).$$

Для практических расчетов теплоемкости всех веществ сводят в таблицы, причем с целью сокращения объема таблиц средние теплоемкости приводят в них для интервала температур от 0 до t .

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

Первый закон термодинамики представляет собой частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии применительно к тепловым явлениям.

Пусть некоторому рабочему телу с объемом V и массой M , имеющему температуру T и давление p , сообщается извне бесконечно малое количество теплоты δQ . В результате подвода теплоты тело нагревается на dT и увеличивается в объеме на dV .

Повышение температуры тела свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц. Увеличение объема тела приводит к изменению потенциальной энергии частиц. В результате внутренняя энергия тела увеличивается на dU . Поскольку рабочее тело окружено средой, которая оказывает на него давление, то при расширении оно производит механическую работу δL против сил внешнего

давления. Так как никаких других изменений в системе не происходит, то по закону сохранения энергии

$$\delta Q = dU + \delta L \quad (4)$$

т. е. теплота, сообщаемая системе, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение внешней работы.

Полученное уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики. Каждый из трех членов этого соотношения может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. $\delta Q = 0$ - теплообмен системы с окружающей средой отсутствует, т. е. теплота к системе не подводится и от нее не отводится. Процесс без теплообмена называется а д и а б а т н ы м . Для него уравнение (4) принимает вид:

$$\delta L = -dU .$$

Следовательно, работа расширения, совершаемая системой в адиабатном процессе, равна уменьшению внутренней энергии данной системы. При адиабатном сжатии рабочего тела затрачиваемая извне работа целиком идет на увеличение внутренней энергии системы.

2. $\delta L = 0$ - при этом объем тела не изменяется, $dV = 0$. Такой процесс называется и з о х о р н ы м , для него

$$\delta Q = dU ,$$

т. е. количество теплоты, подведенное к системе при постоянном объеме, равно увеличению внутренней энергии данной системы.

3. $dU = 0$ – внутренняя энергия системы не изменяется и

$$\delta Q = \delta L ,$$

т.е. сообщаемая системе теплота превращается в эквивалентную ей внешнюю работу.

Для системы, содержащей 1 кг рабочего тела

$$\delta q = du + \delta l. \quad (5)$$

Проинтегрировав уравнения (4) и (5) для некоторого процесса, получим выражение первого закона термодинамики в интегральной форме:

$$Q = \Delta U + L;$$

$$q = \Delta u + l.$$

Внутренняя энергия

Внутренняя энергия системы включает в себя:

- кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения частиц;
- потенциальную энергию взаимодействия частиц;
- энергию электронных оболочек атомов;
- внутриядерную энергию.

В большинстве теплоэнергетических процессов две последние составляющие остаются неизменными. Поэтому в дальнейшем под внутренней энергией будем понимать энергию хаотического движения молекул и атомов, включающую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений как молекулярного, так и внутримолекулярного, а также потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами.

Кинетическая энергия молекул является функцией температуры, значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами и, следовательно, от занимаемого газом объема V , т. е. является функцией V . Поэтому *внутренняя энергия U есть функция состояния тела.*

Для сложной системы она определяется суммой энергий отдельных частей, т. е. обладает свойством аддитивно-

сти. Величина $u=U/M$, называемая удельной внутренней энергией (Дж/кг), представляет собой внутреннюю энергию единицы массы вещества.

В дальнейшем для краткости будем называть величину u просто внутренней энергией. Поскольку внутренняя энергия есть функция состояния тела, то она может быть представлена в виде функции двух любых независимых параметров, определяющих это состояние:

$$u = \varphi(p, V); u = \varphi(p, T); u = \varphi(V, T).$$

Ее изменение в термодинамическом процессе Δu не зависит от характера процесса и определяется только начальным и конечным состояниями тела:

$$\Delta u = \int_1^2 du = u_2 - u_1;$$

u_1 - значение внутренней энергии в начальном состоянии, а u_2 - в конечном.

Математически это означает, что бесконечно малое изменение внутренней энергии du есть полный дифференциал u ; если выразить внутреннюю энергию в виде функции удельного объема и температуры, то

$$du = (\partial u / \partial T)_v dT + (\partial u / \partial v)_T dv.$$

Внутренняя энергия идеального газа, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, не зависит от объема газа или давления

$$[(\partial u / \partial v)_T = 0, (\partial u / \partial p)_T = 0],$$

а определяется только его температурой, поэтому производная от внутренней энергии идеального газа по температуре есть полная производная:

$$(\partial u / \partial T)_p = (\partial u / \partial T)_v = du/dT.$$

Для задач технической термодинамики важно не абсолютное значение внутренней энергии, а ее изменение в

различных термодинамических процессах. Поэтому начало отсчета внутренней энергии может быть выбрано произвольно. Например, в соответствии с международным соглашением для воды за нуль принимается значение внутренней энергии при температуре 0,01 °С и давлении 610,8 Па, а для идеальных газов - при 0 °С вне зависимости от давления.

Работа расширения

Работа всегда связана с перемещением макроскопических тел в пространстве, например перемещением поршня, деформацией оболочки, поэтому она характеризует упорядоченную (макрофизическую) форму передачи энергии от одного тела к другому и является мерой переданной энергии. Поскольку величина δl пропорциональна увеличению объема, то в качестве рабочих тел, предназначенных для преобразования тепловой энергии в механическую, целесообразно выбирать такие, которые обладают способностью значительно увеличивать свой объем. Этим качеством обладают газы и пары жидкостей. Поэтому, например, на тепловых электрических станциях рабочим телом служат пары воды, а в двигателях внутреннего сгорания - газообразные продукты сгорания того или иного топлива.

При конечном изменении объема работа против сил внешнего давления, называемая работой расширения, равна

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

δL и dV всегда имеют одинаковые знаки:

– если $dV > 0$, то и $\delta L > 0$, т. е. при расширении работа тела положительна, при этом тело само совершает работу;

– если же $dV < 0$, то и $\delta L < 0$, т. е. при сжатии работа тела отрицательна: это означает, что не тело совершает работу, а на его сжатие затрачивается работа извне. Единицей измерения работы в СИ является джоуль (Дж).

Отнеся работу расширения к 1 кг массы рабочего тела, получим

$$l = L/M; \quad \delta l = \delta L/M = p dV/M = p d(V/M) = p dV.$$

Величина, представляющая собой удельную работу, совершаемую системой, содержащей 1 кг газа, равна

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv.$$

Поскольку в общем случае p - величина переменная, то интегрирование возможно лишь тогда, когда известен закон изменения давления $p = p(v)$.

Эти формулы справедливы только для равновесных процессов, при которых давление рабочего тела равно давлению окружающей среды.

В термодинамике для исследования равновесных процессов широко используют p v - диаграмму, в которой осью абсцисс служит удельный объем, а осью ординат - давление. Поскольку состояние термодинамической системы определяется двумя параметрами, то на p v - диаграмме оно изображается точкой. На рисунке точка 1 соответствует начальному состоянию системы, точка 2 - конечному, а линия 12 - процессу расширения рабочего тела от v_1 до v_2 . При бесконечно малом изменении объема площадь заштрихованной вертикальной полоски равна $p dv = \delta l$; следовательно, работа процесса 12 изображается площадью, ограниченной кривой процесса, осью абсцисс и крайними ординатами.

Таким образом, *работа изменения объема эквивалентна площади под кривой процесса в диаграмме $p\nu$* (рис. 1).

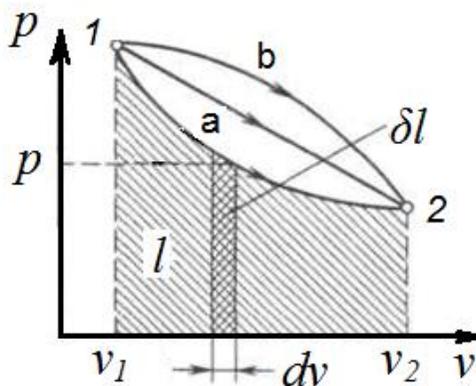


Рис. 1 - Графическое изображение работы в $p\nu$ – координатах

Каждому пути перехода системы из состояния 1 в состояние 2 (например, 12, 1a2 или 1b2) соответствует своя работа расширения. Следовательно, *работа зависит от характера термодинамического процесса*, а не является функцией только исходного и конечного состояний системы. С другой стороны, $\int p d\nu$ зависит от пути интегрирования и, следовательно, элементарная работа δl не является полным дифференциалом.

Работа всегда связана с перемещением макроскопических тел в пространстве, например перемещением поршня, деформацией оболочки, поэтому она характеризует упорядоченную (макрофизическую) форму передачи энергии от одного тела к другому и является мерой переданной энергии. Поскольку величина δl пропорциональна увеличению объема, то в качестве рабочих тел, предназначенных

для преобразования тепловой энергии в механическую, целесообразно выбирать такие, которые обладают способностью значительно увеличивать свой объем. Этим качеством обладают газы и пары жидкостей. Поэтому, например, на тепловых электрических станциях рабочим телом служат пары воды, а в двигателях внутреннего сгорания - газообразные продукты сгорания того или иного топлива.

Теплота

Помимо макрофизической формы передачи энергии - работы существует также и микрофизическая, т. е. осуществляемая на молекулярном уровне форма обмена энергией между системой и окружающей средой. В этом случае энергия может быть передана системе без совершения работы. Мерой количества энергии, переданной микрофизическим путем, служит **теплота**.

Теплота может передаваться либо при непосредственном контакте между телами (теплопроводностью, конвекцией), либо на расстоянии (излучением), причем во всех случаях этот процесс возможен только при наличии разности температур между телами.

Внутренняя энергия - это свойство самой системы, она характеризует состояние системы. Теплота и работа - это энергетические характеристики процессов механического и теплового взаимодействий системы с окружающей средой. Они характеризуют те количества энергии, которые переданы системе или отданы ею через ее границы в определенном процессе.

Энтальпия

В термодинамике важную роль играет сумма внутренней энергии системы U и произведения давления систе-

мы p на ее объем V , называемая энтальпией и обозначаемая H :

$$H = U + pV.$$

Так как входящие в нее величины являются функциями состояния, то и сама энтальпия является функцией состояния. Так же как внутренняя энергия, работа и теплота, она измеряется в джоулях (Дж).

Энтальпия обладает свойством аддитивности. Величина

$$h = u + pv,$$

называемая удельной энтальпией ($h = H/M$), представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в Дж/кг.

Поскольку энтальпия есть функция состояния, то она может быть представлена в виде функции двух любых параметров состояния:

$$h = \varphi_1(p, V); \quad h = \varphi_2(p, T); \quad h = \varphi_3(V, T),$$

а величина dh является полным дифференциалом.

Изменение энтальпии в любом процессе определяется только начальным и конечным состояниями тела и не зависит от характера процесса.

Если давление системы сохраняется неизменным, т. е. осуществляется изобарный процесс ($dp=0$), то

$$\delta q_p = dh \quad \text{и} \quad q_p = h_2 - h_1.$$

Т. е. теплота, подведенная к системе при постоянном давлении, идет только на изменение энтальпии данной системы.

Это выражение очень часто используется в расчетах, так как огромное количество процессов подвода теплоты в теплоэнергетике (в паровых котлах, камерах сгорания газовых турбин и реактивных двигателей, теплообменных аппаратах), а также целый ряд процессов химической техно-

логии и многих других осуществляется при постоянном давлении.

Для идеального газа получим:

$$dh = du + d(pv) = c_v dT + R dT = (c_v + R) dT = c_p dT.$$

Так как между энтальпией и внутренней энергией существует связь:

$$h = u + pv$$

При расчетах практический интерес представляет изменение энтальпии в конечном процессе:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{t_1}^{t_2} c_p dT.$$

Энтропия

Величина $\delta q = du + p dv$ не является полным дифференциалом. Действительно, для того чтобы проинтегрировать правую часть этого выражения, нужно знать зависимость p от v , т. е. процесс, который совершает газ.

В математике доказывается, что дифференциальный двучлен всегда можно превратить в полный дифференциал путем умножения (или деления) на интегрирующий множитель (или делитель). Таким интегрирующим делителем для элементарного количества теплоты q является абсолютная температура T .

Покажем это на примере изменения параметров идеального газа в равновесных процессах:

$$\frac{\delta q}{T} = \frac{c_v dT + p dv}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}.$$

Выражение $\frac{\delta q}{T}$ при равновесном изменении состояния газа есть полный дифференциал некоторой функции состояния. Она называется энтропией, обозначается для 1 кг газа через s и измеряется в Дж/(кг·К). Для произволь-

ного количества газа энтропия, обозначаемая через S , равна $S=Ms$ и измеряется в Дж/К. Таким образом, аналитически энтропия определяется следующим образом:

$$ds = \frac{\delta q}{T}.$$

Эта формула справедлива как для идеальных газов, так и для реальных тел. Подобно любой другой функции состояния энтропия может быть представлена в виде функции любых двух параметров состояния:

$$s = \xi_1(p, V); s = \xi_2(p, T); s = \xi_3(V, T).$$

При температурах, близких к абсолютному нулю, все известные вещества находятся в конденсированном состоянии. В. Нернст (1906 г.) экспериментально установил, а М. Планк (1912 г.) окончательно сформулировал следующий принцип: *при температуре, стремящейся к абсолютному нулю, энтропия вещества, находящегося в конденсированном состоянии с упорядоченной кристаллической структурой, стремится к нулю*, т. е. $s_0 = 0$ при $T = 0$ К. Этот закон называют третьим законом термодинамики или тепловой теоремой Нернста. Он позволяет рассчитать абсолютное значение энтропии в отличие от внутренней энергии и энтальпии, которые всегда отсчитываются от произвольного уровня.

Однако в технической термодинамике обычно используется не абсолютное значение энтропии, а ее изменение в каком-либо процессе:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \delta q/T,$$

поэтому энтропию часто отсчитывают от произвольно выбранного уровня.

Термодинамические процессы идеальных газов в закрытых системах

Основными процессами, весьма важными и в теоретическом, и в прикладном отношении, являются: **изохорный**, протекающий при постоянном объеме; **изобарный**, протекающий при постоянном давлении; **изотермический**, происходящий при постоянной температуре; **адиабатный** - процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой, и **политропный**, удовлетворяющий уравнению $p v^n = \text{const}$.

Метод исследования процессов, не зависящий от их особенностей и являющийся общим, состоит в следующем:

- выводится уравнение процесса, устанавливающее связь между начальными и конечными параметрами рабочего тела в данном процессе;
- вычисляется работа изменения объема газа;
- определяется количество теплоты, подведенной (или отведенной) к газу в процессе;
- определяется изменение внутренней энергии системы в процессе;
- определяется изменение энтропии системы в процессе.

Изохорный процесс (рис. 2). При изохорном процессе выполняется условие $dv = 0$ или $v = \text{const}$. Из уравнения состояния идеального газа следует, что $p/T = R/v = \text{const}$, т. е. давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре:

$$p_2/p_1 = T_2/T_1.$$

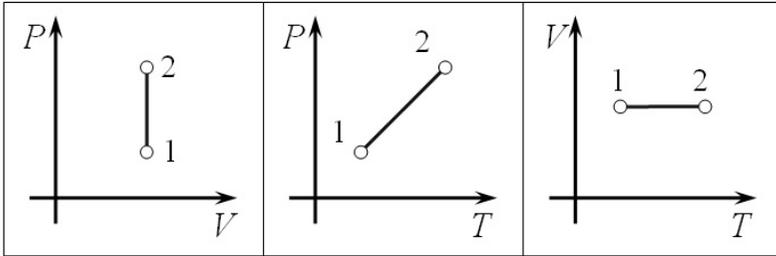


Рис. 2 - Изображение изохорного процесса

Изобарный процесс. Из уравнения состояния идеального газа при $p = \text{const}$ находим

$$v/T = R/p = \text{const}, \text{ или } v_2/v_1 = T_2/T_1,$$

т. е. в изобарном процессе объем газа пропорционален его абсолютной температуре (закон Гей-Люссака, 1802 г.). На рисунке 3 изображен график процесса.

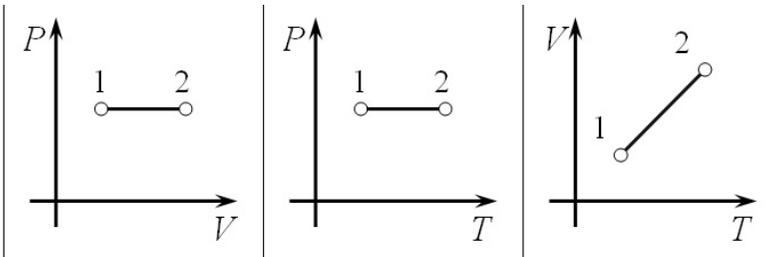


Рис. 3 - Изображение изобарного процесса

Изотермический процесс. При изотермическом процессе температура постоянна, следовательно, $pv = RT = \text{const}$, или

$$p_2/p_1 = v_2/v_1,$$

т. е. давление и объем обратно пропорциональны друг другу, так что при изотермическом сжатии давление газа воз-

растает, а при расширении - падает (закон Бойля - Мариотта, 1662 г.).

Графиком изотермического процесса в pV координатах является равнобокая гипербола, для которой координатные оси служат асимптотами (рис. 4).

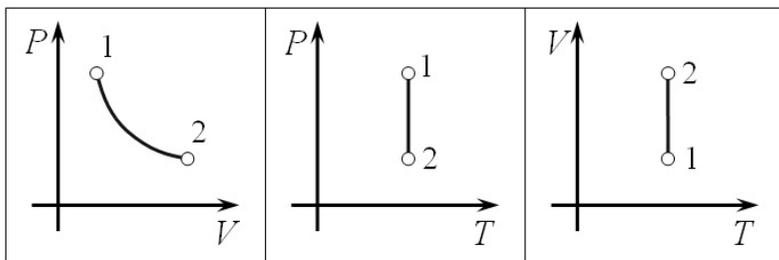


Рис. 4 - Изображение изотермического процесса

Адиабатный процесс. Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется адиабатным, т. е. $\delta q = 0$.

Для того чтобы осуществить такой процесс, следует либо теплоизолировать газ, т. е. поместить его в адиабатную оболочку, либо провести процесс настолько быстро, чтобы изменение температуры газа, обусловленное его теплообменом с окружающей средой, было пренебрежимо мало по сравнению с изменением температуры, вызванным расширением или сжатием газа. Как правило, это возможно, ибо теплообмен происходит значительно медленнее, чем сжатие или расширение газа.

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k.$$

Это уравнение адиабаты идеального газа при постоянном отношении теплоемкостей ($k = \text{const}$). Величина

$$k = c_p / c_v$$

называется показателем адиабаты. Согласно классической кинетической теории теплоемкость газов не зависит от температуры, поэтому можно считать, что величина k также не зависит от температуры и определяется числом степеней свободы молекулы. Для одноатомного газа $k = 1,66$ для двухатомного $k = 1,4$, для трех- и многоатомных газов $k = 1,33$.

Поскольку $k > 1$, то в координатах p - v линия адиабаты идет круче линии изотермы: при адиабатном расширении давление понижается быстрее, чем при изотермическом, так как в процессе расширения уменьшается температура газа (рис. 5).

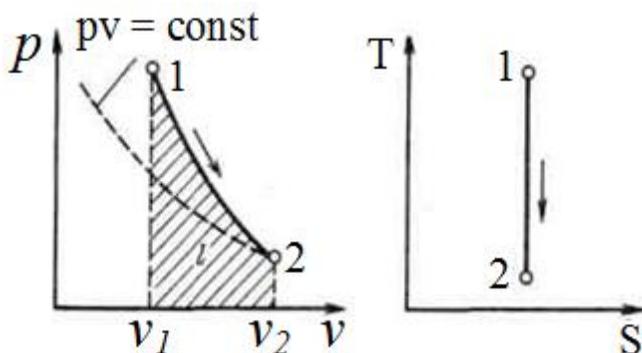


Рис. 5 - Изображение адиабатного процесса

Политропный процесс и его обобщающее значение.

Любой произвольный процесс можно описать в p - v -координатах (по крайней мере, на небольшом участке) уравнением

$$pv^n = \text{const},$$

подбирая соответствующее значение n . Процесс, описываемый таким уравнением, называется политропным. Показатель политропы n может принимать любое численное

значение в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, но для данного процесса он является величиной постоянной.

Политропный процесс имеет обобщающее значение, ибо охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов. Ниже приведены характеристики термодинамических процессов.

Процесс	n	C_n
Изохорный	$+\infty$	c_v
Изобарный	0	c_p
Изотермический	1	∞
Адиабатный	k	0

На рисунке 6 показано взаимное расположение на pV - и Ts -диаграммах политропных процессов с разными значениями показателя политропы. Все процессы начинаются в одной точке («в центре»).

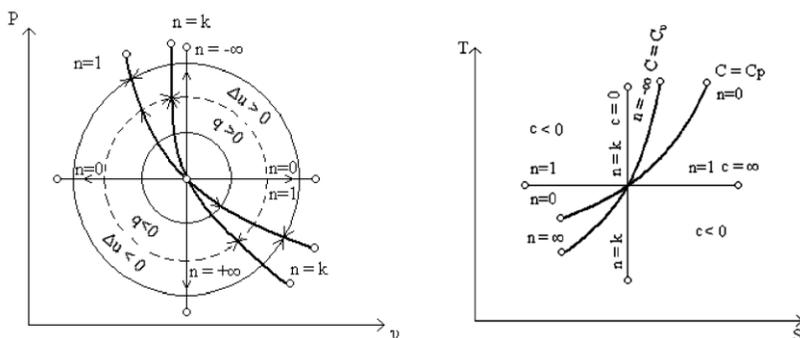


Рис. 6 - Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в pV - и Ts -координатах

Изохора ($n = \pm\infty$) делит поле диаграммы на две области: процессы, находящиеся правее изохоры, характеризуются положительной работой, так как сопровождаются расширением рабочего тела; для процессов, расположенных левее изохоры, характерна отрицательная работа.

Процессы, расположенные правее и выше адиабаты, идут с подводом теплоты к рабочему телу; процессы, лежащие левее и ниже адиабаты, протекают с отводом теплоты.

Для процессов, расположенных над изотермой ($n = 1$), характерно увеличение внутренней энергии газа; процессы, расположенные под изотермой, сопровождаются уменьшением внутренней энергии.

Процессы, расположенные между адиабатой и изотермой, имеют отрицательную теплоемкость, так как δq и du (а следовательно, и dT), имеют в этой области противоположные знаки. В таких процессах $|l| > |q|$, поэтому на производство работы при расширении тратится не только подводимая теплота, но и часть внутренней энергии рабочего тела.

Подготовка к выполнению домашнего задания

Приступая к выполнению домашнего задания, студент должен проработать разделы, посвященные первому и второму законам термодинамики, а также исследованию политропных процессов и циклов, т.е. должны знать следующие основные соотношения термодинамики, справедливые для идеальных газов:

1. Уравнение состояния идеального газа

$$pv = RT, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная.

2. Уравнение политропного термодинамического процесса

$$pv^n = const, \quad (2)$$

где n – показатель политропы.

Соотношения между основными параметрами политропного процесса.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n;$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Здесь и далее индексами «1» и «2» обозначены параметры состояния газа соответственно в начале и в конце рассматриваемого процесса.

3. Связь между изменяющимися параметрами состояния (p и T) в изохорном процессе выражается законом Шарля

$$\frac{p}{T} = const. \quad (3)$$

4. Параметры состояния (v и T) в изобарном процессе связаны между собой законом Гей-Люссака

$$\frac{v}{T} = \text{const}. \quad (4)$$

5. Уравнение первого закона термодинамики

$$q = \Delta u + l. \quad (5)$$

Здесь Δu – изменение внутренней энергии, которое для всех процессов идеального газа равно

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1), \quad (6)$$

где c_v – теплоемкость газа в процессе при постоянном объёме.

6. l – работа расширения (сжатия) газа, которая во всех процессах, кроме изотермического, может быть определена из выражения

$$l = \frac{1}{1-n} (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \frac{R}{1-n} (T_2 - T_1). \quad (7)$$

Работа газа в изотермическом процессе равна

$$l = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (8)$$

Для определения работы газа в адиабатном процессе, кроме выражения (7) можно использовать следующую формулу

$$l = -\Delta u = c_v (T_1 - T_2). \quad (9)$$

7. Изменение энтальпии для всех процессов идеального газа равно

$$\Delta H = H_2 - H_1 = c_p (T_2 - T_1), \quad (10)$$

где в соответствии с формулой Майера теплоёмкость газа в процессе при постоянном давлении равна

$$c_p = c_v + R. \quad (11)$$

8. Уравнение для определения количества теплоты

$$q = c_n(T_2 - T_1), \quad (12)$$

где c_n – теплоемкость газа в политропном процессе, равная

$$c_n = c_v + \frac{R}{1-n}, \quad (13)$$

или

$$c_n = c_v \frac{k-n}{1-n}. \quad (14)$$

Здесь k – показатель адиабаты, равный

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

для воздуха $k=1,4$.

9. Аналитическое выражение второго закона термодинамики:

$$ds = \frac{dq}{T}, \quad (15)$$

или

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (16)$$

и

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (17)$$

10. Определение средней теплоемкости

$c|_{T_1}^{T_2}$ определяют с использованием таблиц или графических зависимостей средней теплоемкости в интервале температур от 0 до данной температуры T :

$$c|_{T_1}^{T_2} = \frac{c|_0^{T_2} \cdot T_2 - c|_0^{T_1} \cdot T_1}{T_2 - T_1} \quad (18)$$

По зависимости истинной теплоемкости $c=f(T)$ вместо интегрирования приближенно определяют $c|_{T_1}^{T_2}$ при средней температуре $T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}$, $c|_{T_1}^{T_2} = c(T_{cp})$. Например, при линейной зависимости

$$c|_{T_1}^{T_2} = a + b \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (19)$$

Задание

По данным (см. таблицу 1) рассчитать цикл тепловой машины. В качестве рабочего тела принять один килограмм воздуха, считая его идеальным газом.

Определить

Параметры всех точек цикла (P, V, S, T).

Для каждого процесса найти:

- а) среднюю (за процесс) теплоёмкость, считая её зависящей от температуры по линейной аппроксимации;
- б) изменение внутренней энергии ΔU ;
- в) работу A ;
- г) количество теплоты Q ;
- д) изменение энтальпии ΔH ;
- е) изменение энтропии ΔS .

За цикл в целом определить:

- а) изменение внутренней энергии $\Sigma \Delta U$;
- б) работу ΣA ;
- в) количество теплоты ΣQ ;
- г) изменение энтальпии $\Sigma \Delta H$;
- д) изменение энтропии $\Sigma \Delta S$;

- е) термический коэффициент полезного действия цикла η_t ;
- ж) термический коэффициент полезного действия цикла Карно, проверенного в том же интервале температур $\eta_{к}$;
- з) построить в выбранном масштабе по точкам в координатах P-V и T-S рассчитанный цикл. Линии каждого процесса строить не менее чем по одной промежуточной точке.

Схема цикла в P-V координатах

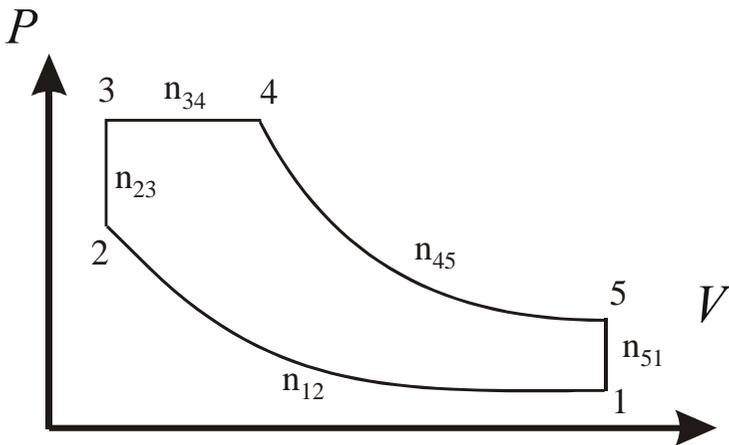


Таблица 1

№ п/п	n ₁₂	n ₂₃	n ₃₄	n ₄₅	n ₅₁	P·10 ⁻⁵ Па	V м ³ /кг	t °C	ε=V ₁ / V ₂	λ=P ₃ / P ₂	β=V ₄ / V ₃
1	1,36	∞	0	1,25	∞	1,50	-	20	7	1,5	1,5
2	1,38	∞	0	1,28	∞	0,95	1,10	-	14	1,3	1,4
3	1,34	∞	0	1,27	∞	1,00	-	45	6	2,0	1,8
4	1,37	∞	0	1,26	∞	0,90	-	25	12	1,4	1,5
5	1,40	∞	0	1,30	∞	1,10	0,90	-	13	1,3	1,6
6	1,39	∞	0	1,30	∞	1,20	0,85	-	5	2,0	1,8
7	1,37	∞	0	1,32	∞	0,95	1,10	-	6	1,8	1,5
8	1,39	∞	0	1,29	∞	1,10	-	20	15	1,3	1,4
9	1,41	∞	0	1,25	∞	1,00	-	25	8	1,6	1,5
10	1,41	∞	0	1,30	∞	0,90	0,90	-	14	1,3	1,2
11	1,33	∞	0	1,27	∞	1,10	0,90	-	7	2,0	1,3
12	1,32	∞	0	1,25	∞	1,00	-	17	12	1,4	1,5
13	1,38	∞	0	1,26	∞	0,90	-	25	6	2,2	1,3
14	1,37	∞	0	1,29	∞	0,90	1,00	-	14	1,3	1,4
15	1,38	∞	0	1,28	∞	1,00	-	30	13	1,4	1,4
16	1,36	∞	0	1,26	∞	-	0,95	27	8	2,0	1,5
17	1,38	∞	0	1,29	∞	-	0,90	30	15	1,2	1,3
18	1,38	∞	0	1,26	∞	-	1,10	20	16	1,3	1,5
19	1,36	∞	0	1,28	∞	1,00	-	30	10	1,5	1,4
20	1,33	∞	0	1,26	∞	0,90	-	35	6	1,6	1,6
21	1,37	∞	0	1,30	∞	-	0,80	50	14	1,5	1,3
22	1,35	∞	0	1,22	∞	-	0,70	30	5	2,2	1,6
23	1,38	∞	0	1,24	∞	1,00	0,90	-	9	1,8	1,5
24	1,40	∞	0	1,23	∞	1,10	0,80	-	10	1,6	1,6
25	1,41	∞	0	1,21	∞	1,10	-	27	11	1,4	1,5
26	1,40	∞	0	1,28	∞	-	1,00	27	12	1,3	1,4
27	1,38	∞	0	1,27	∞	1,00	0,90	-	12	1,4	1,4
28	1,40	∞	0	1,29	∞	0,95	0,95	-	14	1,3	1,3
29	1,39	∞	0	1,30	∞	0,90	-	20	10	1,6	1,4
30	1,37	∞	0	1,31	∞	1,05	-	27	8	2,0	1,2

Пример расчета цикла

Исходные данные:

n_{12}	n_{23}	n_{34}	n_{45}	n_{51}	$P_1 \cdot 10^5,$ Па	$V_1,$ м ³ /кг	$t_1,$ °C	$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$	$\lambda = \frac{P_3}{P_2}$	$\beta = \frac{V_4}{V_3}$
1,38	∞	0	1,26	∞	0,90	-	25	6	2,2	1,3

Решение:

Расчёт точек цикла.

Термодинамические параметры точки 1.

Абсолютная температура в точке 1:

$$T_1 = (t_1 + 273)K = (25 + 273)K = 298K .$$

Расчет объёма газа в точке 1:

$$P_1 V_1 = RT_1 ,$$

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 298}{0,9 \cdot 10^5} = 0,95 \text{ м}^3 .$$

1. Процесс 1-2. Политропный процесс.

Давление газа в точке 2:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n_{12}} = P_1 \varepsilon^{n_{12}} = 0,9 \cdot 6^{1,38} = 10,668 \text{ атм} ,$$

Объём газа в точке 2:

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0,95}{6} = 0,158 \text{ м}^3 .$$

Температура газа в точке 2:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n_{12}-1} = 298 \cdot 6^{1,38-1} = 588,727K .$$

2. Процесс 2-3. Изохорный процесс.

Давление газа в точке 3:

$$P_3 = P_2 \lambda = 10,668 \cdot 2,2 = 23,47 \text{ атм.}$$

Объём газа в точке 3:

$$V_3 = V_2 = 0,158 \text{ м}^3.$$

Температура газа в точке 3:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right) = 588,727 \cdot 2,2 = 1295,2 \text{ К.}$$

3. Процесс 3-4. Изобарный процесс.

Давление газа в точке 4:

$$P_4 = P_3 = 23,47 \text{ атм.}$$

Объём газа в точке 4:

$$V_4 = V_3 \cdot \beta = 0,158 \cdot 1,3 = 0,205 \text{ м}^3.$$

Температура газа в точке 4:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_4}{V_3} \right) = 1295,2 \cdot 1,3 = 1683,76 \text{ К.}$$

4. Процесс 4-5. Политропный процесс.

Объём газа в точке 5:

$$V_5 = V_1 = 0,95 \text{ м}^3.$$

Давление газа в точке 5:

$$P_5 = P_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{n_{45}} = 23,47 \left(\frac{0,205}{0,95} \right)^{1,26} = 3,4 \text{ атм.}$$

Температура газа в точке 5:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{n_{45}-1} = 1683,76 \left(\frac{0,205}{0,95} \right)^{1,26-1} = 1130,129 \text{ К.}$$

№	$P \cdot 10^5$ (Па)	V , м ³ /кг	T(K)
1	0,19	0,95	298
2	10,668	0,158	588,727
3	23,47	0,158	1295,2

4	23,47	0,205	1683,76
5	3,4	0,95	1130,129

Расчет теплоемкостей в идеально газовом приближении.

1. Процесс 1-2. Политропный процесс.

$t_1 = 25^\circ \text{C}$, $t_2 = 316^\circ \text{C}$, т.к. $t_\Sigma < 1000^\circ \text{C}$, то, используя таблицу интерполяционных формул для средних массовых и объемных теплоемкостей газов, имеем линейный закон.

$$C_{pm} = 0,9952 + 0,00009349 \cdot (25 + 316) = 1,027 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

$$C_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 \cdot (25 + 316) = 0,74 \text{ кДж}/(\text{кгК})$$

Проверка:

$$C_{pm} - C_{vm} = R = 1,027 - 0,74 = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

2. Процесс 2-3. Изохорный процесс.

$$t_2 = 316^\circ \text{C}, t_3 = 1022^\circ \text{C}.$$

$$t_2' = 300^\circ \text{C}, t_3' = 1000^\circ \text{C}.$$

$$t_2'' = 400^\circ \text{C}, t_3'' = 1100^\circ \text{C}.$$

$$C_{pm} \Big|_0^{t_2} = C_{pm} \Big|_0^{t_2'} + \frac{(t_2 - t_2') \left(C_{pm} \Big|_0^{t_2''} - C_{pm} \Big|_0^{t_2'} \right)}{t_2'' - t_2'}.$$

$$C_{pm} \Big|_0^{316} = 1,019 + \frac{(316 - 300)(1,028 - 1,019)}{400 - 300} = 1,021 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

$$C_{pm} \Big|_0^{1022} = 1,090 + \frac{(316 - 300)(1,10 - 1,09)}{400 - 300} = 1,092 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

$$C_{pm} \Big|_{316}^{1022} = \frac{1,092 \cdot 1022 - 1,021 \cdot 316}{1022 - 316} = 1,124 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

$$C_{vm} = C_{pm} - R = 1,124 - 0,287 = 0,837 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

3. Процесс 3-4. Изобарный процесс.

$$t_3 = 1022^\circ \text{C}, t_4 = 1411^\circ \text{C}.$$

$$t_3' = 1000^\circ \text{C}, t_4' = 1400^\circ \text{C}.$$

$$t_3'' = 1100^\circ \text{C}, t_4'' = 1500^\circ \text{C}.$$

$$C_{pm} \Big|_0^{1022} = 1,090 + \frac{(1022 - 1000)(1,10 - 1,09)}{1100 - 1000} = 1,092 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

$$C_{pm} \Big|_0^{1411} = 1,124 + \frac{(1411 - 1400)(1,131 - 1,124)}{1500 - 1400} = 1,125 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

$$C_{pm} \Big|_{1022}^{1411} = \frac{1,125 \cdot 1411 - 1,092 \cdot 1022}{1411 - 1022} = 1,212 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

$$C_{vm} = C_{pm} - R = 1,212 - 0,287 = 0,925 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

4. Процесс 4-5. Политропный процесс.

$$t_4 = 1411^\circ \text{C}, t_5 = 857^\circ \text{C}.$$

$$t_4' = 1400^\circ \text{C}, t_5' = 800^\circ \text{C}.$$

$$t_4'' = 1500^\circ \text{C}, t_5'' = 900^\circ \text{C}.$$

$$C_{pm} \Big|_0^{1411} = 1,124 + \frac{(1411 - 1400)(1,131 - 1,124)}{1500 - 1400} = 1,125 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

$$C_{pm} \Big|_0^{857} = 1,071 + \frac{(857 - 800)(1,081 - 1,071)}{900 - 800} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

$$C_{pm} \Big|_{1411}^{857} = \frac{1,077 \cdot 857 - 1,125 \cdot 1411}{857 - 1411} = 1,199 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

$$C_{vm} = C_{pm} - R = 1,199 - 0,287 = 0,912 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

5. Процесс 5-1. Изохорный процесс.

$t_5 = 857^\circ \text{C}$, $t_1 = 25^\circ \text{C}$, т.к. $t_\Sigma < 1000^\circ \text{C}$, то используем линейный закон.

$$C_{pm} = 0,9952 + 0,00009349(857 + 25) = 1,078 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

$$C_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 \cdot (857 + 25) = 0,791 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

Проверка:

$$C_{pm} - C_{vm} = R = 1,078 - 0,791 = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кгК}).$$

Расчёт работы.

$$A_{1-2} = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n-1} = \frac{0,9 \cdot 10^5 \cdot 0,95 - 10,668 \cdot 10^5 \cdot 0,158}{1,38 - 1} =$$

$$= -218,6 \text{ кДж}/\text{кг}$$

$$A_{2-3} = 0 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

$$A_{3-4} = P_4 (V_4 - V_3) = 23,47 \cdot 10^5 (0,205 - 0,158) = 110,3 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

$$A_{4-5} = \frac{P_4 V_4 - P_5 V_5}{n-1} = \frac{23,47 \cdot 10^5 \cdot 0,205 - 3,4 \cdot 10^5 \cdot 0,95}{1,26 - 1} =$$

$$= 703,2 \text{ кДж}/\text{кг}$$

$$A_{5-1} = 0 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Расчёт количества теплоты.

$$Q_{1-2} = C_{vm} \frac{\left(n - \frac{C_{pm}}{C_{vm}} \right) (T_2 - T_1)}{n-1} = 0,74 \cdot$$

$$\frac{\left(1,38 - \frac{1,027}{0,74} \right) (588,727 - 298)}{1,38 - 1} = -4,43 \text{ кДж}/\text{кг}$$

$$Q_{2-3} = C_{vm} (T_3 - T_2) = 0,837(1295,2 - 588,727) = 591,3 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

$$Q_{3-4} = C_{pm} (T_4 - T_3) = 1,212(1683,76 - 1295,2) = 470,9 \text{ кДж}/\text{кг}$$

$$Q_{4-5} = C_{vm} \frac{\left(n - \frac{C_{pm}}{C_{vm}} \right) (T_5 - T_4)}{n - 1} = 0,912 \cdot$$

$$\frac{\left(1,26 - \frac{1,199}{0,912} \right) (1130,129 - 1683,76)}{1,26 - 1} = 106,8 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{5-1} = C_{vm} (T_1 - T_5) = 0,791(298 - 1130,129) = -658,2 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии.

$$\Delta U_{1-2} = C_{vm} (T_2 - T_1) = 0,74(588,727 - 298) = 215,14 \text{ кДж/кг}.$$

Проверим:

$$\Delta U_{1-2} = Q_{1-2} - A_{1-2} = -4,43 + 218,6 = 214,2 \text{ кДж/кг}.$$

$$\varepsilon = \frac{215,14 - 214,2}{214,2} \cdot 100\% = 0,44\%.$$

$$\Delta U_{2-3} = Q_{2-3} = 591,3 \text{ кДж/кг}.$$

$$\Delta U_{3-4} = C_{vm} (T_4 - T_3) = 0,925(1683,76 - 1295,2) = 359,4 \text{ кДж/кг}.$$

Проверим:

$$\Delta U_{3-4} = Q_{3-4} - A_{3-4} = 470,9 - 110,3 = 360,6 \text{ кДж/кг}.$$

$$\varepsilon = \frac{360,6 - 359,4}{359,4} \cdot 100\% = 0,33\%.$$

$$\Delta U_{4-5} = C_{vm} (T_5 - T_4) = 0,912(1130,129 - 1683,76) =$$

$$= -504,9 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta U_{4-5} = Q_{4-5} - A_{4-5} = 106,8 - 703,2 = -596,4 \text{ кДж/кг}.$$

$$\varepsilon = \frac{596,4 - 504,9}{504,9} \cdot 100\% = 18,1\%$$

$$\Delta U_{5-1} = Q_{5-1} = -658,2 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение энтальпии.

$$\Delta H_{1-2} = C_{pm}(T_2 - T_1) = 1,027(588,727 - 298) = 298,6 \text{ кДж/кг.}$$

$$\Delta H_{2-3} = C_{pm}(T_3 - T_2) = 1,124(1295,2 - 588,727) = 794,1 \text{ кДж/кг.}$$

$$\Delta H_{3-4} = C_{pm}(T_4 - T_3) = 1,212(1683,76 - 1295,2) = 470,9 \text{ кДж/кг.}$$

$$\Delta H_{4-5} = C_{pm}(T_5 - T_4) = 1,199(1130,129 - 1683,76) =$$

$$= -663,8 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta H_{5-1} = C_{pm}(T_1 - T_5) = 1,078(298 - 1130,129) = -897 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтропии.

$$\Delta S_{1-2} = C_{vm} \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,74 \frac{1,38-1,388}{1,38-1} \cdot \ln \frac{588,727}{298} =$$

$$= -0,011 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

$$\Delta S_{2-3} = C_{vm} \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,837 \cdot \ln \frac{1295,2}{588,727} = 0,66 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

$$\Delta S_{3-4} = C_{vm} \ln \frac{T_4}{T_3} = 0,925 \cdot \ln \frac{1683,76}{1295,2} = 0,24 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

$$\Delta S_{4-5} = C_{vm} \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_5}{T_4} = 0,912 \frac{1,26-1,31}{1,26-1} \cdot$$

$$\ln \frac{1130,129}{1683,76} = 0,07 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

$$\Delta S_{5-1} = C_{vm} \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,791 \cdot \ln \frac{298}{1130,129} = -1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Найдем термический коэффициент полезного действия цикла Карно приведенного в том же интервале температур

$$\eta_{у.к.} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{298}{1683,76} = 0,82.$$

Найдем термический коэффициент полезного действия цикла η_t

$$\eta_{у} = \frac{A_{у}}{Q_1} = \frac{594,9}{591,3 + 470,9 + 106,8} = 0,51.$$

№ п/п	A, кДж/кг	Q, кДж/кг	ΔU , кДж/кг	ΔH , кДж/кг	ΔS , кДж/(кг·К)
1-2	-218,6	-4,43	215,14	298,6	-0,011
2-3	0	591,3	591,3	794,1	0,66
3-4	110,3	470,9	359,4	470,9	0,24
4-5	703,2	106,8	-504,9	-663,8	0,07
5-1	0	-658,2	-658,2	-897	-1,05
Σ	594,9	506,4	2,74	2,8	-0,09

Контрольные вопросы

1. Что называется термодинамическим процессом?
2. Какой процесс называется политропным?
3. Какой процесс называется обратимым?
4. Что называется круговым процессом или циклом?
5. Какова физическая сущность газовой постоянной?
6. От каких параметров состояния зависит внутренняя энергия идеального газа?
7. Чему равно изменение внутренней энергии в круговом процессе (цикле)?
8. Что изображает площадь под кривой процесса в (p-v) диаграмме?
9. Что изображает площадь под кривой процесса в (T-s) диаграмме?
10. Сформулируйте первый закон термодинамики.
11. Что называется удельной теплоёмкостью?
12. Почему теплоёмкость газа при постоянном давлении больше его теплоёмкости при постоянном объёме?
13. Как определить приращение энтропии идеального газа в зависимости от основных параметров состояния?
14. Почему в адиабатном процессе сжатия температура газа возрастает?
15. Почему в изотермическом процессе расширения газа его температура остается постоянной?
16. Как графически изображаются в p-v и T-s диаграммах изобара, изохора, изотерма и адиабата?
17. Какие условия требуются для создания непрерывного процесса превращения теплоты в работу?
18. Исследовать и изобразить в p-v и T-s диаграммах процессы сжатия воздуха при следующих значениях показателя политропы: $n=2$; $n=1,2$; $n=0,5$; $n=-0,5$; $n=-2$.

19. Исследовать и изобразить в $p-v$ и $T-s$ диаграммах процессы расширения воздуха при следующих значениях показателя политропы: $n=2$; $n=1,2$; $n=0,5$; $n=-0,5$; $n=-2$.

20. Исследовать и изобразить в $p-v$ и $T-s$ диаграммах процессы, проходящие с увеличением внутренней энергии воздуха при следующих значениях показателя политропы: $n=5$; $n=1,3$; $n=-5$.

21. Исследовать и изобразить в $p-v$ и $T-s$ диаграммах процессы, проходящие с уменьшением давления воздуха при следующих значениях показателя политропы: $n=2$; $n=1,1$; $n=0,5$; $n=-2$.

22. Написать уравнение работы расширения в произвольном процессе.

ЧАСТЬ II. Теория теплообмена

Расчет водо-водяного теплообменного аппарата

Введение

В промышленности широко распространены тепловые процессы - нагревание и охлаждение жидкостей и газов и конденсация паров, которые проводятся в теплообменных аппаратах. Теплообменные аппараты или просто теплообменники используются практически во всех отраслях промышленности. Их основная задача обеспечить температурный режим технологических процессов.

В настоящее время теплообменные аппараты, используемые в промышленности, подразделяются на определённые группы по следующим признакам: по назначению (нагреватели, испарители и кипятильники; холодильники, конденсаторы и т. д.), по режиму работы, по особенностям конструкции и т. д. Холодильники и конденсаторы служат для охлаждения потока или конденсации паров с применением специальных хладагентов (вода, воздух, пропан, хлористый метил, фреоны и т. д.).

Поверхностные теплообменные аппараты можно разделить на следующие типы по конструктивным признакам:

- а) кожухотрубные теплообменники (жёсткого типа; с линзовым компенсатором на корпусе; с плавающей головкой; с U-образными трубками);
- б) теплообменники типа “труба в трубе”;
- в) подогреватели с паровым пространством (рибойлеры);
- г) конденсаторы воздушного охлаждения.

Кожухотрубные теплообменники в настоящее время наиболее широко распространены, по некоторым данным они составляют до 80% от всей теплообменной аппаратуры. Основной частью такого теплообменника является пу-

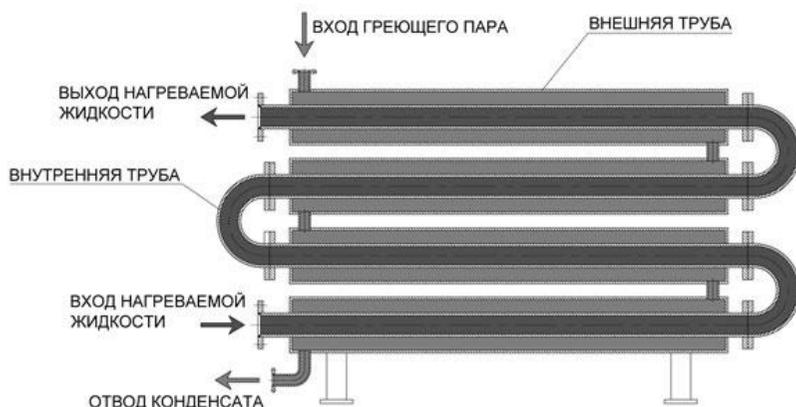
чок труб, закреплённых в трубных решётках. Трубки располагаются в трубном пучке в шахматном порядке или по вершинам треугольников. Одна из теплообменивающихся сред движется по трубкам, а другая – внутри корпуса между трубками.

Достоинством кожухотрубного теплообменника является возможность получения значительной поверхности теплообмена при сравнительно небольших габаритах и хорошо освоенная; недостатком – более высокий расход материала по сравнению с некоторыми современными типами теплообменных аппаратов (спиральными, пластинчатыми теплообменниками и т. д.). Теплообменники могут быть вертикального горизонтального исполнения. Оба варианта установки одинаково широко распространены и выбираются в основном по соображениям монтажа: вертикальные занимают меньшую площадь в цехе, горизонтальные могут быть размещены в сравнительно невысоком помещении. Материал изготовления теплообменников – углеродистая или нержавеющая сталь.

По оценкам экспертов на изготовление трубчатых теплообменников расходуется около трети всего металла, потребляемого машиностроением. Поэтому разработка методов интенсификации теплообмена способствующих снижению массы теплообменников, экономии материалов, является актуальной проблемой, которой занимаются специалисты многих стран. Одним из наиболее простых и эффективных путей интенсификации теплообмена является изменение формы и режима движения теплоносителя.

Конструкция теплообменника типа «труба в трубе» включает в себя сдвоенные трубки, которые располагаются в несколько рядов в одном пакете друг над другом. Текущие среды теплообменного аппарата относительно друг друга находятся в противотоке. В результате подогрева

жидкого вещества греющим паром, оно притекает внизу и по внутренней трубке поднимается вверх. Пар в полости корпуса подается в верхней части и затем опускается вниз, в самое глубокое место, где отводится конденсат. В целях поддержания нужной температуры охлаждающей жидкости, она притекает в нижней части корпуса. Очищаются теплообменные поверхности только механически и на прямом участке. Данный вид теплообменных аппаратов наиболее часто используется для работ под открытым небом.



Задание

Произвести тепловой расчет водо-водяного теплообменника типа "труба в трубе". Определить площадь поверхности нагрева F и число секций n , если длина одной секции l .

Греющая вода движется по внутренней стальной трубе диаметром $\frac{d_2}{d_1}$ и имеет температуру на входе $t'_{ж1}$. Расход греющей воды G_1 .

Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от $t'_{ж2}$ до $t''_{ж2}$. Внутренний диаметр внешней трубы D . Расход нагреваемой воды G_2 .

Потерями теплоты через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

Коэффициент теплопроводности стальных труб считать постоянным и равным $\lambda_c = 45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$.

Теплоемкость воды принять постоянной и равной $C_p = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг К})$.

Физические характеристики воды в интервале температур от 0°С до 100°С можно определить по следующим уравнениям в зависимости от температуры:

- Плотность

$$\rho = \rho_0 - 0,47 \cdot t,$$

где $\rho_0 = 1010 \text{ кг}/\text{м}^3$;

- Коэффициент кинематической вязкости воды

$$\nu_{ж} = (1,089 - 0,00948 \cdot t_{ж}) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

- Коэффициент теплопроводности воды

$$\lambda = \lambda_0 + 0,0012 \cdot t,$$

где $\lambda_0 = 0,581 \text{ Вт/(м К)}$;

- Число Прандтля

$$\text{Pr} = \text{Pr}_0 - 0,0694 \cdot t,$$

где $\text{Pr}_0 = 7,5$.

Толщина стенки внутренней трубы δ .

Эквивалентный диаметр для кольцевого канала определяется как

$$d_3 = D - d_2.$$

Диаметры присоединительных патрубков для входа и выхода греющей и нагреваемой воды $d_1^{\text{вх}}$, $d_1^{\text{вых}}$, $d_2^{\text{вх}}$, $d_2^{\text{вых}}$ соответственно:

$$d_1 = \frac{1}{30} \cdot \sqrt{\frac{G_1}{3,14 \cdot C_{\text{доп}} \cdot \rho}}, \text{ м};$$

$$d_2 = \frac{1}{30} \cdot \sqrt{\frac{G_2}{3,14 \cdot C_{\text{доп}} \cdot \rho}}, \text{ м},$$

где: $C_{\text{доп}} = 1 \div 2,5 \text{ м/с}$ – допустимая скорость воды в присоединительных патрубках.

Полученные диаметры патрубков необходимо округлить до унифицированных, которые выбираются из следующего ряда условных проходов трубопроводов:

6, 10, 15, 20, 25, 32, 40,

50, 70, 80, 100, 125, 150,

200, 250, 300, 350, 400, 500 мм.

Используя результаты расчета, на миллиметровой бумаге построить графические зависимости изменения температур холодного и горячего теплоносителей по поверхности теплообмена (формат А4).

Таблица 1

Параметры, их обозначение и единицы измерения	Номера вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина трубной секции l , м	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	3,0	1,5	1,6	1,7	1,8
Диаметр внутренней трубы d_2/d_1 , мм	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22	25/22
Толщина стенки внутренней трубы δ , м	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Внутренний диаметр внешней трубы D , мм	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36
Расход греющей воды G_1 , кг/ч	2000	2100	2200	2300	2400	2000	2100	2200	2300	2400
Температура греющей воды на входе $t'_{ж1}$, °C	85	90	95	85	90	95	85	90	95	85
Расход нагреваемой воды G_2 , кг/ч	3000	3000	3000	3100	3100	3100	3100	3200	3200	3200
Температура нагреваемой воды на входе $t'_{ж2}$, °C	12	15	17	15	17	12	17	15	12	12
Температура нагреваемой воды на выходе $t''_{ж2}$, °C	40	45	50	40	40	45	50	40	45	50

Продолжение таблицы 1

Параметры, их обозначение и единицы измерения	Номера вариантов									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Длина трубной секции l , м	1,9	2,0	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	1,9
Диаметр внутренней трубы d_2/d_1 , мм	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34	38/34
Толщина стенки внутренней трубы δ , м	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Внутренний диаметр внешней трубы D , мм	48	46	48	46	48	46	48	46	48	46
Расход греющей воды G_1 , кг/ч	2000	2100	2200	2300	2400	2000	2100	2200	2300	2400
Температура греющей воды на входе $t'_{ж1}$, °C	90	95	85	90	95	85	90	95	85	90
Расход нагреваемой воды G_2 , кг/ч	3200	3200	3200	3100	3100	3100	3100	3000	3000	3000
Температура нагреваемой воды на входе $t'_{ж2}$, °C	15	17	15	17	12	12	12	12	15	15
Температура нагреваемой воды на выходе $t''_{ж2}$, °C	50	45	45	50	40	40	45	50	45	50

Продолжение таблицы 1

Параметры, их обозначение и единицы измерения	Номера вариантов									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Длина трубной секции l , м	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Диаметр внутренней трубы d_2/d_1 , мм	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43	48/43
Толщина стенки внутренней трубы δ , м	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Внутренний диаметр внешней трубы D , мм	57	59	57	59	57	59	57	59	57	59
Расход греющей воды G_1 , кг/ч	2000	2100	2200	2300	2400	2000	2100	2200	2300	2400
Температура греющей воды на входе $t'_{ж1}$, °C	95	85	90	95	85	90	95	85	90	95
Расход нагреваемой воды G_2 , кг/ч	3000	3000	3000	3100	3100	3100	3100	3200	3200	3200
Температура нагреваемой воды на входе $t'_{ж2}$, °C	15	17	17	17	12	12	17	15	15	15
Температура нагреваемой воды на выходе $t''_{ж2}$, °C	40	50	40	45	45	50	50	50	40	50

Пример расчета теплообменника

Исходные данные:

Длина трубной секции	$l = 1,5 \text{ м}$
Диаметр внутренней трубы	$d_2/d_1 = 35/32 \text{ мм}$
Толщина стенки внутренней трубы	$\delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$
Внутренний диаметр внешней трубы	$D = 48 \text{ мм}$
Расход греющей воды	$G_1 = 2130 \text{ кг/ч}$
Температура греющей воды на входе	$t'_{ж1} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$
Расход нагреваемой воды	$G_2 = 3200 \text{ кг/ч}$
Температура нагреваемой воды на входе	$t'_{ж2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура нагреваемой воды на выходе	$t''_{ж2} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

1. Количество передаваемой теплоты

$$Q = G_2 \cdot C_p \cdot (t''_{ж2} - t'_{ж2}) = \frac{3200}{3600} \cdot 4190 \cdot (45 - 15) = 111,733 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

2. Температура греющей воды на выходе

$$t''_{ж1} = t'_{ж1} - \frac{Q}{G_1 \cdot C_p} = 95 - \frac{111,73 \cdot 10^3 \cdot 3600}{2130 \cdot 4190} = 49,93 \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

3. Средняя температура греющей воды

$$t_{ж1} = 0,5 \cdot (t'_{ж1} + t''_{ж1}) = 0,5 \cdot (95 + 50) = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

4. Плотность греющей воды

$$\rho_{ж1} = 1010 - 0,47 \cdot t_{ж1} = 1010 - 0,47 \cdot 72,5 = 976 \text{ кг/м}^3$$

5. Коэффициент кинематической вязкости греющей воды

$$\nu_{ж1} = (1,089 - 0,00948 \cdot t_{ж1}) \cdot 10^{-6} = (1,089 - 0,00948 \cdot 72,5) \cdot 10^{-6} = 0,402 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

6. Коэффициент теплопроводности греющей воды

$$\lambda_{ж1} = 0,581 + 0,0012 \cdot t_{ж1} = 0,581 + 0,0012 \cdot 72,5 =$$

$$= 0,67 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

7. Число Прандтля по температуре греющей воды

$$\text{Pr}_{ж1} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{ж1} = 7,5 - 0,0694 \cdot 72,5 = 2,47$$

8. Средняя температура нагреваемой воды

$$t_{ж2} = 0,5 \cdot (t'_{ж2} + t''_{ж2}) = 0,5 \cdot (15 + 45) = 30^\circ\text{C},$$

9. Плотность нагреваемой воды

$$\rho_{ж2} = 1010 - 0,47 \cdot t_{ж2} = 1010 - 0,47 \cdot 30 = 996 \text{ кг}/\text{м}^3$$

10. Коэффициент кинематической вязкости нагреваемой воды

$$\nu_{ж2} = (1,089 - 0,00948 \cdot t_{ж2}) \cdot 10^{-6} = (1,089 - 0,00948 \cdot 30) \cdot$$

$$\cdot 10^{-6} = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

11. Коэффициент теплопроводности нагреваемой воды

$$\lambda_{ж2} = 0,581 + 0,0012 \cdot t_{ж2} = 0,581 + 0,0012 \cdot 30 =$$

$$= 0,617 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

12. Число Прандтля по температуре нагреваемой воды

$$\text{Pr}_{ж2} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{ж2} = 7,5 - 0,0694 \cdot 30 = 5,42$$

13. Скорость движения греющей воды

$$W_1 = \frac{4 \cdot G_1}{\rho_{ж1} \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot 3600} =$$

$$= \frac{4 \cdot 2130}{976 \cdot 3,14 \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3600} = 0,754 \text{ м}/\text{с}$$

14. Скорость движения нагреваемой воды

$$W_2 = \frac{4 \cdot G_2}{\rho_{ж2} \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot 3600} =$$

$$= \frac{4 \cdot 3200}{996 \cdot 3.14 \cdot (13 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3600} = 6,73 \text{ м/с}$$

где $d_3 = D - d_2 = (48 - 35) \cdot 10^{-3} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

15. Число Рейнольдса для потока греющей воды

$$Re_{ж1} = \frac{W_1 \cdot d_1}{\nu_{ж1}} = \frac{0,754 \cdot 0,0320}{0,402 \cdot 10^{-6}} = 6 \cdot 10^4$$

$Re_{ж1} \geq 2300$, следовательно, режим течения турбулентный и расчет ведем по формуле (2):

16. Число Нуссельта

$$Nu_{ж1} = 0,021 \cdot Re_{ж1}^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж1}}{Pr_{c1}} \right)^{0,25}$$

17. Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся ее значением

$$t_{c1} \approx 0,5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5 \cdot (72,5 + 30) = 51,25^\circ \text{C}$$

18. Число Прандтля по температуре стенки

$$Pr_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot 51,25 = 3,95$$

Число Нуссельта со стороны греющей воды (см. п. 16)

$$Nu_{ж1} = 0,021 \cdot (6 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot (2,47)^{0,43} \cdot \left(\frac{2,47}{3,95} \right)^{0,25} = 183$$

19. Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы

$$\alpha_1 = Nu_{ж1} \cdot \frac{\lambda_{ж1}}{d_1} = 183 \cdot \frac{0,67}{32 \cdot 10^{-3}} = 3831,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

20. Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды

$$\text{Re}_{ж2} = \frac{W_2 \cdot d_3}{\nu_{ж2}} = \frac{6,73 \cdot 13 \cdot 10^{-3}}{0,805 \cdot 10^{-6}} = 1,09 \cdot 10^5$$

$\text{Re}_{ж2} \geq 2300$ т. е, режим течения турбулентный.

21. Принимаем в первом приближении температуру стенки со стороны нагреваемой воды

$$t_{c2} = t_{c1} = 51,25^\circ\text{C}$$

22. Число Прандтля по температуре стенки

$$\text{Pr}_{c2} = \text{Pr}_{c1} = 3,95$$

23. Число Нуссельта со стороны нагреваемой воды (2)

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{ж2} &= 0,017 \cdot \text{Re}_{ж2}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{ж2}^{0,4} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{ж2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18} = \\ &= 0,017 \cdot (1,09 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 5,42^{0,4} \cdot \left(\frac{5,42}{3,95} \right)^{0,25} \cdot \\ &\cdot \left(\frac{48}{35} \right)^{0,18} = 410,23 \end{aligned}$$

24. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой воде

$$\alpha_2 = \text{Nu}_{ж2} \cdot \frac{\lambda_{ж2}}{d_3} = 410,23 \cdot \frac{0,617}{13 \cdot 10^{-3}} = 1,95 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

25. Коэффициент теплопередачи

$$\text{K} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3831,6} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{1,95 \cdot 10^4}} = 2893,5$$

26. Наибольший температурный напор

$$\Delta t_{\bar{o}} = t'_{ж1} - t''_{ж2} = 95 - 45 = 50^\circ\text{C}$$

27. Наименьший температурный напор

$$\Delta t_m = t''_{жс1} - t'_{жс2} = 50 - 15 = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

28. Отношение

$$\frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_m} = \frac{50}{35} = 1,43 \leq 1,5$$

поэтому расчет можно вести по среднеарифметическому напору (в противном случае – по среднелогарифмическому).

29. Средний температурный напор

$$\Delta t_{cp} = t_{жс1} - t_{жс2} = 72,5 - 30 = 42,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

30. Плотность теплового потока

$$q = K \cdot \Delta t_{cp} = 2893,5 \cdot 42,5 = 1,23 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$$

31. Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{111,73 \cdot 10^3}{1,23 \cdot 10^5} = 0,9 \text{ м}^2$$

32. Число секций

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d_1 \cdot l} = \frac{0,9}{3,14 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5} = 5,97 \approx 6$$

33. Температура стенки трубы со стороны греющей воды

$$t_{c1} = t_{жс1} - \frac{q}{\alpha_1} = 72,5 - \frac{1,23 \cdot 10^5}{3831,6} = 40,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

34. При этой температуре

$$Pr'_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot 40,4 = 4,7$$

35. Уточненное значение поправки

$$\left(\frac{Pr_{жс1}}{Pr'_{c1}} \right)^{0,25} = \left(\frac{2,47}{4,7} \right)^{0,25} = 0,851$$

Было принято: $\left(\frac{2,47}{3,95} \right)^{0,25} = 0,889$.

$$\left| 1 - \frac{0,851}{0,889} \right| = 0,0427 < 0,05, \text{ поэтому во втором при-}$$

ближении нет необходимости.

В случае невыполнения условия п. 35 необходимо сделать второе приближение расчета, начиная с п. 17, приняв в качестве температуры стенки t_{c1} ее уточненное значение, полученное в п. 33. Обычно второго приближения бывает достаточно.

36. Температура стенки со стороны нагреваемой воды

$$t_{c2} = t_{ж1} + \frac{q}{\alpha_2} = 30 + \frac{1,23 \cdot 10^5}{1,95 \cdot 10^4} = 36,3^\circ\text{C}$$

При этой температуре

$$\text{Pr}'_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot 36,3 = 4,98$$

37. Уточненное значение поправки

$$\left(\frac{\text{Pr}_{ж2}}{\text{Pr}'_{c2}} \right)^{0,25} = \left(\frac{5,42}{4,98} \right)^{0,25} = 1,02$$

Было принято: $\left(\frac{5,42}{3,95} \right)^{0,25} = 1,082$

$$\left| 1 - \frac{1,02}{1,082} \right| = 0,057 > 0,05, \text{ поэтому необходимо сделать вто-}$$

рое приближение расчета, начиная с п. 21, приняв в качестве температуры стенки t_{c2} ее уточненное значение, полученное в п. 36. Обычно второго приближения бывает достаточно.

38. Принимаем во втором приближении температуру стенки со стороны нагреваемой воды

$$t_{c2} = 36,3^\circ\text{C}$$

39. Число Прандтля по температуре стенки

$$\text{Pr}_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot 36,3 = 4,98$$

40. Число Нуссельта со стороны нагреваемой воды (2)

$$\begin{aligned} Nu_{ж2} &= 0,017 \cdot \text{Re}_{ж2}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{ж2}^{0,4} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{ж2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18} = \\ &= 0,017 \cdot (1,09 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 5,42^{0,4} \cdot \left(\frac{5,42}{4,98} \right)^{0,25} \cdot \\ &\cdot \left(\frac{48}{35} \right)^{0,18} = 387,14 \end{aligned}$$

41. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой воде

$$\alpha_2 = Nu_{ж2} \cdot \frac{\lambda_{ж2}}{d_3} = 387,14 \cdot \frac{0,617}{13 \cdot 10^{-3}} = 1,84 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

42. Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3831,6} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{1,84 \cdot 10^4}} = 2868,05$$

43. Плотность теплового потока

$$q = K \cdot \Delta t_{cp} = 2868,05 \cdot 42,5 = 1,219 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

44. Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{111,73 \cdot 10^3}{1,219 \cdot 10^5} = 0,92 \text{ м}^2$$

45. Число секций

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d_1 \cdot l} = \frac{0,92}{3,14 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5} = 6,1 = 7$$

46. Температура стенки трубы со стороны греющей воды

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{q}{\alpha_1} = 72,5 - \frac{1,219 \cdot 10^5}{3831,6} = 40,68^\circ\text{C}$$

47. При этой температуре

$$\text{Pr}'_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c1} = 7,5 - 0,0694 \cdot 40,68 = 4,68$$

48. Уточненное значение поправки

$$\left(\frac{\text{Pr}_{ж1}}{\text{Pr}'_{c1}} \right)^{0,25} = \left(\frac{2,47}{4,68} \right)^{0,25} = 0,852$$

Было принято: $\left(\frac{2,47}{3,95} \right)^{0,25} = 0,889$.

$$\left| 1 - \frac{0,852}{0,889} \right| = 0,0416 < 0,05, \text{ поэтому во втором при-}$$

ближении нет необходимости.

49. Температура стенки со стороны нагреваемой воды

$$t_{c2} = t_{ж1} + \frac{q}{\alpha_2} = 30 + \frac{1,19 \cdot 10^5}{1,84 \cdot 10^4} = 36,47^\circ\text{C}$$

При этой температуре

$$\text{Pr}'_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot t_{c2} = 7,5 - 0,0694 \cdot 36,47 = 4,968$$

50. Уточненное значение поправки

$$\left(\frac{\text{Pr}_{ж2}}{\text{Pr}'_{c2}} \right)^{0,25} = \left(\frac{5,42}{4,968} \right)^{0,25} = 1,022$$

Было принято: $\left(\frac{5,42}{4,98} \right)^{0,25} = 1,021$

$$\left| 1 - \frac{1,021}{1,022} \right| = 0 > 0,05, \text{ поэтому третье приближение не}$$

нужно, в данном случае совпадение точное.

Принимаем $F = 0,92 \text{ м}^2$, $n = 7$.

Приложения

Приложение 1

*Интерполяционные формулы для средних массовых и
объемных теплоемкостей газов*

Газ	Теплоемкость в кДж/(кг·К)	
	массовая	объемная
В пределах 0 – 1000 °С		
O ₂	$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724 t$	$c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183 t$
	$c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724 t$	$c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183 t$
N ₂	$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 t$	$c'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492 t$
	$c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382 t$	$c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492 t$
CO	$c_{pm} = 1,0304 + 0,00009575 t$	$c'_{pm} = 1,2883 + 0,00011966 t$
	$c_{vm} = 0,7335 + 0,00009575 t$	$c'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966 t$
Воздух	$c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349 t$	$c'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091 t$
	$c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 t$	$c'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091 t$
H ₂ O	$c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278 t$	$c'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551 t$
	$c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278 t$	$c'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551 t$
SO ₂	$c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541 t$	$c'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547 t$
	$c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541 t$	$c'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547 t$
В пределах 0 – 1500 °С		
H ₂	$c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574 t$	$c'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355 t$
	$c_{vm} = 10,1241 + 0,00059574 t$	$c'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355 t$
CO ₂	$c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053 t$	$c'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756 t$
	$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053 t$	$c'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756 t$

Приложение 2

Теплоемкости газов

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p,$ кДж/ (кг·К)	$c_v,$ кДж/ (кг·К)	$c_{pm},$ кДж/ (кг·К)	$c_{vm},$ кДж/ (кг·К)	$\bar{n}'_{pm},$ кДж/ (мм ³ ·К)	$c'_{vm},$ кДж/ (мм ³ ·К)	$\mu c_p,$ кДж/ (кмоль·К)	$\mu c_v,$ кДж/ (кмоль·К)
Воздух								
$\mu = 29 \text{ кг/кмоль}, \rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3, R = 287,0 \text{ Дж/(кг·К)}$								
0	1,003	0,716	1,003	0,716	1,297	0,926	29,07	20,75
100	1,010	0,723	1,006	0,719	1,300	0,929	29,15	20,83
200	1,024	0,737	1,011	0,724	1,307	0,936	29,29	20,98
300	1,044	0,758	1,019	0,732	1,317	0,946	29,52	21,20
400	1,068	0,781	1,028	0,741	1,329	0,958	29,78	21,47
500	1,092	0,805	1,038	0,752	1,342	0,972	30,09	21,78
600	1,115	0,828	1,049	0,762	1,356	0,985	30,40	22,08
700	1,135	0,848	1,060	0,773	1,370	1,000	30,72	22,40
800	1,154	0,867	1,071	0,784	1,384	1,013	31,02	22,71
900	1,170	0,883	1,081	0,794	1,397	1,026	31,32	23,00
1000	1,184	0,897	1,090	0,804	1,409	1,039	31,59	23,28
1100	1,197	0,910	1,100	0,812	1,421	1,050	31,86	23,54
1200	1,208	0,921	1,108	0,821	1,432	1,061	32,10	23,79
1300	1,218	0,931	1,116	0,829	1,443	1,072	32,34	24,02
1400	1,226	0,940	1,124	0,837	1,452	1,082	32,59	24,24
1500	1,234	0,948	1,131	0,844	1,462	1,091	32,77	24,45
1600	1,242	0,955	1,138	0,850	1,470	1,100	32,96	24,65
1700	1,248	0,961	1,144	0,857	1,478	1,108	33,14	24,83
1800	1,254	0,967	1,150	0,863	1,486	1,116	33,31	25,00
1900	1,260	0,973	1,156	0,868	1,494	1,123	33,48	25,16
2000	1,265	0,978	1,161	0,874	1,501	1,129	33,63	25,32
2100	1,270	0,983	1,166	0,879	1,507	1,136	33,78	25,47
2200	1,275	0,987	1,171	0,884	1,513	1,142	33,92	25,61
2300	1,279	0,992	1,175	0,889	1,519	1,148	34,05	25,74
2400	1,283	0,996	1,180	0,893	1,525	1,154	34,18	25,87
2500	1,287	1,000	1,184	0,897	1,530	1,159	34,30	25,99

Учебное пособие

Федина Виктория Викторовна

Теплотехника

Методические указания по выполнению домашнего задания
для студентов, обучающихся по направлению
«Горное дело»

Технический редактор: Иванова Н.И.

Компьютерный набор : Федина В.В.

Корректор: Иванова Н.И.

Бумага для множительной техники

Подписано к печати _____

Формат _____ Усл.печ.листов _____

Тираж ___ экз. Заказ _____

Отпечатано с авторского оригинала в отделе оперативной печати

Старооскольского технологического института

Старый Оскол, микрорайон Макаренко,40