

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к практическим занятиям
для студентов специальности
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»

В двух частях
Часть 1

Витебск
2023

УДК 621.036.7 (075.8)

Составители:

В. И. Ольшанский, А. А. Котов

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 6 от 27.02.2023.

Техническая термодинамика : методические указания к практическим занятиям. В 2 ч. Ч. 1 / сост. В. И. Ольшанский, А. А. Котов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2023. – 55 с.

Методические указания предназначены для выполнения практических занятий по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.036.7 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Тема 1. Основные термодинамические параметры состояния, уравнение состояния идеального газа	5
Тема 2. Смеси идеальных газов	11
Тема 3. Теплоемкость идеальных газов	17
Тема 4. Основные термодинамические процессы с идеальными газами	22
Тема 5. Основные параметры состояния, диаграммы и таблицы водяного пара	32
Тема 6. Основные термодинамические процессы с водяным паром	38
Литература	45
Приложения	46

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения практических занятий по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

Основное назначение практических занятий – дать студентам материал, который позволит выработать навыки применения теоретических сведений для решения конкретных задач технического характера и тем самым освоить практику и методику термодинамических расчетов.

Методические указания включают в себя практические занятия по основным разделам курса технической термодинамики, связанным с расчетом термодинамических параметров и процессов. Каждая тема практических занятий содержит краткие сведения из теории, касающиеся материала раздела.

Методически указания к практическим занятиям составлены так, что студенты могут выполнить сравнительный анализ теоретических значений основных термодинамических параметров с реальными их значениями.

Выполнение практических занятий предполагает знание студентами основных теоретических положений курса технической термодинамики, соответствующей терминологии, уравнений и формул.

Для лучшего освоения студентами основ технической термодинамики, а также развития самостоятельного инженерного мышления рекомендуется после проведения расчетов проанализировать полученные результаты и выяснить влияние на них различных факторов.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ, УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Теоретическое введение

Свойства вещества могут быть интенсивными и экстенсивными. Интенсивные – свойства, величина которых не зависит от количества вещества в системе; экстенсивные – свойства, величина которых зависит от количества вещества в системе. При описании состояния термодинамической системы целесообразно использовать ее интенсивные свойства. Для придания экстенсивным свойствам характера интенсивных их относят к некоторой единице вещества (чаще всего – к единице массы), такие свойства называют удельными.

Интенсивные свойства, определяющие состояние термодинамической системы, называются термодинамическими параметрами состояния системы. Из всех существующих параметров состояния три параметра в совокупности вполне однозначно определяют состояние термодинамической системы и называются основными термодинамическими параметрами состояния. Эти параметры – давление, температура и удельный объем.

Давление p характеризует интенсивность воздействия сил на поверхность какого-либо тела и представляет собой отношение силы P , равномерно распределенной по перпендикулярной к ней поверхности, к площади этой поверхности F :

$$p = \frac{P}{F}. \quad (1.1)$$

В международной системе единиц (СИ) давление измеряется в паскалях (Па). $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

В технической системе единиц (МКС) давление измеряется в кг/м^2 . $1 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$.

В физической системе единиц (СГС) давление измеряется в дин/см^2 . $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$.

Величина давления может быть выражена высотой создающего его столба жидкости, в качестве которой чаще всего используют ртуть (с плотностью $\rho_{рт.} = 13595 \text{ кг/м}^3$) и давление выражают в миллиметрах ртутного столба (*мм рт. ст.*). $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$.

Используются также и различные внесистемные единицы для измерения давления, примерно соответствующие нормальному атмосферному давлению: бар и атмосфера (техническая и физическая).

$$1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Техническая атмосфера (*ат*) – давление воздуха на высоте 200 м над уровнем моря. $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10000 \text{ кг/м}^2 = 98100 \text{ Па}$.

Физическая атмосфера (*атм*) – давление воздуха на уровне моря на географической широте 45° . $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$.

В англоязычных странах (Великобритании, США и некоторых других) давление измеряется в *psi* (pound-force per square inch, lbf/in^2 – фунт силы на квадратный дюйм) $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Па}$.

Различают абсолютное $p_{\text{абс.}}$, избыточное $p_{\text{изб.}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак.}}$ давление.

Абсолютным называется такое давление, которое отсчитывается от абсолютного нуля давлений (абсолютного вакуума). Именно значения абсолютного давления используются в термодинамических расчетах.

На практике величина давления обычно измеряется относительно атмосферного, или барометрического, давления $p_{\text{бар.}}$. Если при этом абсолютное давление будет больше барометрического ($p_{\text{абс.}} > p_{\text{бар.}}$), то разность между абсолютным и барометрическим давлением называется избыточным давлением:

$$p_{\text{изб.}} = p_{\text{абс.}} - p_{\text{бар.}} \quad (1.2)$$

если же абсолютное давление будет меньше барометрического ($p_{\text{абс.}} < p_{\text{бар.}}$), то разность между барометрическим и абсолютным давлением называется вакуумметрическим давлением (вакуумом):

$$p_{\text{вак.}} = p_{\text{бар.}} - p_{\text{абс.}} \quad (1.3)$$

Температура характеризует степень нагретости вещества и является функцией средней кинетической энергии его частиц.

В отечественной практике в настоящее время используются две температурные шкалы: международная стоградусная практическая температурная шкала, или шкала Цельсия, и абсолютная термодинамическая температурная шкала, или шкала Кельвина.

Температура по шкале Цельсия обозначается t и измеряется в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$). За нулевую отметку этой шкалы принимается температура плавления льда, а температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении соответствует значение 100°C . Таким образом, один градус Цельсия равен одной сотой части интервала температур плавления льда и кипения воды.

Температура по шкале Кельвина, или абсолютная температура, обозначается T , измеряется она в градусах Кельвина или кельвинах ($^\circ\text{K}$, K). При этом величина одного градуса по шкале Цельсия и по шкале Кельвина совпадает ($1^\circ\text{C} = 1^\circ\text{K}$), соответственно, и разности температур также будут одинаковы ($\Delta t = \Delta T$), а нулевая отметка шкалы Кельвина, так называемый «абсолютный нуль», лежит на 273° (строго – $273,15$) ниже нулевой отметки шкалы Цельсия.

Значения температуры по Кельвину T и по Цельсию t , таким образом, связаны соотношением

$$T(^{\circ}K) = t(^{\circ}C) + 273. \quad (1.4)$$

В англоязычных странах (Великобритания, США) для измерения температуры применяются шкалы Ренкина (T , $^{\circ}R$) и Фаренгейта (t , $^{\circ}F$), при этом нулевая отметка шкалы Ренкина совпадает с нулевой отметкой шкалы Кельвина. Для пересчета температур, выраженных в этих шкалах, используются следующие соотношения:

$$T(^{\circ}R) = t(^{\circ}F) + 459,67; \quad (1.5)$$

$$T(^{\circ}K) = \frac{5}{9} \cdot T(^{\circ}R); \quad (1.6)$$

$$t(^{\circ}C) = \frac{5}{9} \cdot (t(^{\circ}F) - 32). \quad (1.7)$$

Удельный объем v – объем, занимаемый единицей массы вещества:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.8)$$

измеряется в m^3/kg . Обратная удельному объему величина – плотность ρ – представляет собой массу единицы вещества:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}, \quad (1.9)$$

измеряется в kg/m^3 .

Часто значения термодинамических параметров указывают при некоторых строго определенных условиях – так называемых нормальных или стандартных. Под нормальными физическими условиями подразумевают абсолютное давление 760 мм рт. ст. (101325 Па) и температуру $0^{\circ}C$ ($273^{\circ}K$). Стандартные условия – то же самое абсолютное давление 760 мм рт. ст. (101325 Па) и температура $20^{\circ}C$ ($293^{\circ}K$).

Идеальными называют такие газы, в которых отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, а сами молекулы представляют собой равномерно распределенные в объеме газа хаотически движущиеся материальные точки (когда объем самих молекул несоизмеримо меньше общего объема газа).

Связь между основными термодинамическими параметрами идеального

газа может быть выражена уравнением, называемым параметрическим уравнением состояния идеального газа, или уравнением Клапейрона, которое для единицы массы имеет вид:

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (1.10)$$

а для некоторого произвольного количества вещества может быть записано как

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T, \quad (1.11)$$

где p – абсолютное давление газа, Па; v – удельный объем газа, м³/кг; V – объем газа, м³; m – масса газа, кг; T – абсолютная температура, °К; R – газовая постоянная

$$R = \frac{p \cdot v}{T}. \quad (1.12)$$

Газовая постоянная R , измеряемая в Дж/кг·град, представляет собой величину, численно равную работе, совершаемой единицей массы идеального газа при нагревании его на 1 градус при постоянном давлении. Величина газовой постоянной идеального газа зависит только от вида газа и не зависит от его состояния. Значения газовой постоянной некоторых газов при нормальных условиях приводятся в приложении Б.

Иногда в термодинамических расчетах используется понятие универсальной газовой постоянной μR . Величина универсальной газовой постоянной соответствует работе, совершаемой единицей количества вещества (1 моль) идеального газа при нагревании его на 1 градус при постоянном давлении; $\mu R = 8,314$ Дж/моль·град.

Значение газовой постоянной для любого газа может быть вычислено по формуле

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8,314}{\mu}, \text{ Дж/кг·град}, \quad (1.13)$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/моль.

Задачи

Задача 1.1. Определить величину атмосферного давления в помещении в барах, если показания установленного в нем барометра составляют 745 мм рт. ст.

Задача 1.2. Определить величину атмосферного давления в помещении в физических атмосферах, если показания установленного в нем барометра составляют 1003 *гПа*.

Задача 1.3. Определить величину абсолютного давления газа в баллоне, если избыточное давление в нем составляет 3,25 *ат*, а барометрическое давление равно 737 *мм рт. ст.*

Задача 1.4. Определить величину абсолютного давления газа в баллоне, если показания установленного на нем манометра 72,5 *psi*, а барометра, находящегося в помещении – 753 *мм рт. ст.*

Задача 1.5. Определить величину абсолютного давления в конденсаторе паровой турбины, если показания присоединенного к конденсатору вакуумметра 723 *мм рт. ст.* при барометрическом давлении 749 *мм рт. ст.*

Задача 1.6. При барометрическом давлении 745 *мм рт. ст.* манометр, установленный на баллоне с газом, показывает 0,25 *бар*. Каковы будут показания этого манометра при нормальном атмосферном давлении?

Задача 1.7. Манометр маслосистемы, установленный в открытой кабине самолета показывает на земле 100 *psi* при барометрическом давлении 739 *мм рт. ст.* Определить абсолютное давление масла в *ат*. Каким будет показание манометра после подъема на высоту, на которой атмосферное давление составляет 590 *гПа*, если абсолютное давление масла остается неизменным?

Задача 1.8. Температура пара на выходе из перегревателя парового котла равна 950 $^{\circ}F$. Перевести эту температуру в $^{\circ}C$.

Задача 1.9. Определить абсолютную температуру воздуха в помещении (в $^{\circ}K$), если установленный в нем термометр показывает 73 $^{\circ}F$.

Задача 1.10. Абсолютная температура газа составляет 1500 $^{\circ}R$, определить его температуру в $^{\circ}C$.

Задача 1.11. В баллоне объемом 40 л находится углекислый газ при абсолютном давлении 45 *атм* и температуре 25 $^{\circ}C$. Определить плотность и массу газа.

Задача 1.12. В баллоне находится воздух при избыточном давлении 57250 $кГ/м^2$ и температуре 24 $^{\circ}C$. Определить плотность воздуха, если барометрическое давление составляет 756 *мм рт. ст.*

Задача 1.13. Аэростат объемом 4000 м^3 заполнен водородом с избыточным давлением 6250 дин/см^2 при температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить подъемную силу аэростата, если атмосферное давление равно 762 мм рт. ст. , а температура воздуха $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Масса оболочки аэростата 700 кг .

Задача 1.14. В баллоне находится аргон при избыточном давлении $4,45 \text{ атм}$ и температуре $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить удельный объем газа, если барометрическое давление составляет 1008 гПа .

Задача 1.15. В баллоне находится азот под абсолютным давлением 75 ат и с температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить удельный объем газа.

Задача 1.16. В баллоне объемом 40 л находится кислород при избыточном давлении 145 psi и температуре $85 \text{ }^\circ\text{F}$. Определить массу кислорода, если барометрическое давление составляет 739 мм рт. ст.

Задача 1.17. В баллоне находится газ при избыточном давлении $90,75 \text{ ат}$ и температуре $18 \text{ }^\circ\text{C}$. До какой температуры может быть нагрет баллон, если максимальное допустимое давление в нем составляет 1500 psi .

Задача 1.18. Баллон, в котором находится азот при избыточном давлении 20 бар , был перенесен из помещения с температурой $22 \text{ }^\circ\text{C}$ на улицу, где температура составляет $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить, какое давление будет в баллоне, когда он остынет до температуры окружающего воздуха.

Задача 1.19. Компрессор подает потребителям $7,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ сжатого воздуха с давлением 12 ат и температурой $48 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить производительность компрессора, приведенную к нормальным условиям.

Задача 1.20. Производительность компрессора при нормальных условиях составляет 12 л/мин . Определить количество подаваемого компрессором потребителям сжатого воздуха, если его конечное давление $0,735 \text{ МПа}$, а температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

ТЕМА 2

СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Теоретическое введение

Под газовой смесью понимается механическая смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси.

Газовая смесь идеальных газов подчиняется закону Дальтона, который гласит, что общее давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений газов, составляющих эту смесь:

$$p_{см.} = \sum p_i, \quad (2.1)$$

где $p_{см.}$ – давление газовой смеси; p_i – парциальные давления составляющих смесь газов.

Парциальное давление – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Параметры газовой смеси могут быть определены по уравнению Клапейрона

$$p_{см.} \cdot V_{см.} = m_{см.} \cdot R_{см.} \cdot T. \quad (2.2)$$

Таким образом, главной задачей расчета газовой смеси является определение на основании заданного состава смеси газовой постоянной, или средней молекулярной массы смеси газов, после чего расчет всех остальных параметров можно произвести на основании параметрического уравнения состояния для смеси.

Часто также требуется определение парциальных давлений газов, входящих в смесь.

Газовая смесь может быть задана массовыми, объемными и мольными долями.

Массовой долей называется отношение массы каждого газа, составляющего смесь, к общей массе смеси:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см.}}, \quad (2.3)$$

где g_i – массовая доля газа; m_i – масса газа; $m_{см.}$ – масса всей смеси газов.

Сумма массовых долей всех составляющих смеси равна единице:

$$\sum g_i = 1. \quad (2.4)$$

Сумма масс всех составляющих смесь газов равна массе смеси:

$$\sum m_i = m_{см.} \cdot \quad (2.5)$$

Объемной долей называется отношение парциального объема каждого газа, составляющего смесь, к общему объему газовой смеси:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{см.}}, \quad (2.6)$$

где r_i – объемная доля газа; V_i – парциальный объем газа; $V_{см.}$ – объем смеси газов.

Парциальным (приведенным) объемом газа называется объем, который занимал бы этот газ, если бы его температура и давление были равны температуре и давлению смеси газов. При постоянной температуре парциальный объем каждого газа, составляющего смесь, можно определить как

$$V_i = \frac{p_i}{p_{см.}} \cdot V_{см.} \cdot \quad (2.7)$$

Сумма объемных долей всех составляющих смеси равна единице:

$$\sum r_i = 1. \quad (2.8)$$

Сумма парциальных объемов всех составляющих смесь газов равна объему смеси газов:

$$\sum V_i = V_{см.} \cdot \quad (2.9)$$

Мольной долей называется отношение количества молей каждого газа, составляющего смесь, к общему количеству молей смеси газов. Задание состава смеси мольными долями равнозначно заданию ее объемными долями.

Между плотностями, удельными объемами, молекулярными массами и газовыми постоянными каждой из составляющих газовой смеси и всей смеси в целом существует следующая зависимость:

$$\frac{\rho_i}{\rho_{см.}} = \frac{v_{см.}}{v_i} = \frac{\mu_i}{\mu_{см.}} = \frac{R_{см.}}{R_i} \cdot \quad (2.10)$$

Также можно записать, что

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см.}} = \frac{\rho_i \cdot V_i}{\rho_{см.} \cdot V_{см.}} = \frac{\rho_i}{\rho_{см.}} \cdot r_i. \quad (2.11)$$

Последние два соотношения позволяют получить несколько уравнений, связывающих массовые и объемные доли:

$$g_i = \frac{\nu_{см.}}{\nu_i} \cdot r_i = \frac{\mu_i}{\mu_{см.}} \cdot r_i = \frac{R_{см.}}{R_i} \cdot r_i; \quad (2.12)$$

$$r_i = \frac{\rho_{см.}}{\rho_i} \cdot g_i = \frac{\nu_i}{\nu_{см.}} \cdot g_i = \frac{\mu_{см.}}{\mu_i} \cdot g_i = \frac{R_i}{R_{см.}} \cdot g_i. \quad (2.13)$$

Эти уравнения позволяют получить формулы для определения газовой постоянной смеси газов.

Если задан массовый состав смеси, то

$$r_i = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{см.}} \quad (2.14)$$

и

$$\sum r_i = \frac{\sum g_i \cdot R_i}{R_{см.}} = 1, \quad (2.15)$$

откуда

$$R_{см.} = \sum g_i \cdot R_i. \quad (2.16)$$

Если задан объемный состав смеси, то

$$g_i = \frac{R_{см.}}{R_i} \cdot r_i \quad (2.17)$$

и

$$\sum g_i = R_{см.} \cdot \sum \frac{r_i}{R_i} = 1, \quad (2.18)$$

откуда

$$R_{см.} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}}. \quad (2.19)$$

Кроме того, газовую постоянную смеси можно определить по известной средней молекулярной массе смеси:

$$R_{см.} = \frac{\mu R}{\mu_{см.}}. \quad (2.20)$$

Соответственно, если известна величина газовой постоянной смеси, то ее средняя молекулярная масса может быть найдена как

$$\mu_{см.} = \frac{\mu R}{R_{см.}}. \quad (2.21)$$

Если смесь задана массовыми долями, то

$$\mu_{см.} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}; \quad (2.22)$$

если смесь задана объемными долями, то

$$\mu_{см.} = \sum r_i \cdot \mu_i. \quad (2.23)$$

Парциальные давления газов, составляющих смесь, могут быть определены как через массовые доли:

$$p_i = g_i \cdot \frac{R_i}{R_{см.}} \cdot p_{см.} = g_i \cdot \frac{\mu_{см.}}{\mu_i} \cdot p_{см.}, \quad (2.24)$$

так и через объемные доли:

$$p_i = r_i \cdot p_{см.}. \quad (2.25)$$

Задачи

Задача 2.1. В состав газовой смеси входит 5,12 кг углекислого газа и 4,88 кг азота. Определить состав в массовых и объемных долях, среднюю молекулярную массу и газовую постоянную смеси, а также ее объем при нормальных условиях.

Задача 2.2. В газовой смеси, состоящей из водорода и угарного газа, массовое содержание водорода 6,67 %. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Задача 2.3. Так называемый гремучий газ состоит из 11,1 массовых долей водорода и 88,9 кислорода. Определить объемный состав, величину газовой постоянной, плотность газовой смеси и парциальные давления газов при нормальных условиях.

Задача 2.4. Анализ показал следующий состав продуктов сгорания топлива: $r(\text{CO}_2) = 0,122$, $r(\text{O}_2) = 0,071$, $r(\text{CO}) = 0,008$, $r(\text{N}_2) = 0,799$. Определить массовый состав этой газовой смеси.

Задача 2.5. Объемный состав продуктов сгорания топлива: 6,5 % кислорода, 11,7 % углекислого газа, 16,6 % водяного пара и 65,2 % азота. Найти состав в массовых долях, среднюю молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность продуктов сгорания при давлении 750 мм рт. ст. и температуре 800 °С.

Задача 2.6. Получаемый в газогенераторах светильный газ имеет следующий объемный состав: 48 % водорода, 35 % метана, 12 % угарного газа и 5 % азота. Определить массовый состав светильного газа, его плотность при температуре 20 °С и давлении 1,036 ат, а также парциальные давления каждого из компонентов.

Задача 2.7. Коксовый газ, состоящий по объему из 57 % водорода, 23 % метана, 6 % угарного газа, 2 % углекислого газа и 12 % азота, находится в шарообразном газгольдере диаметром 5 м. Определить массу газа при избыточном давлении 0,98 атм, если параметры окружающей среды: давление 743 мм рт. ст. и температура 18 °С.

Задача 2.8. Массовый состав газовой смеси: 8,4 % водорода, 48,7 % метана, 6,9 % этилена, 17,2 % угарного газ, 7,4 % углекислого газа, 4,7 % кислорода и 6,7 % азота. Определить объемный состав, газовую постоянную смеси, а также плотность каждого из компонентов смеси при температуре 23 °С и давлении 0,995 бар.

Задача 2.9. Определить газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления составляющих ее газов, если она по объему состоит из 12 % углекислого газа, 2 % сернистого газ, 7 % водяного пара, 5 % кислорода и 74 % азота. Общее давление смеси 754 мм рт. ст., а температура 22 °С.

Задача 2.10. Смесь газов состоит из 0,25 кг водорода, 1,37 кг аммиака, 1,53 кг метана, 2,12 кг этилена, 3,48 кг углекислого газа и 5,77 кг азота. Определить состав в массовых и объемных долях, газовую постоянную и среднюю молекулярную массу смеси и плотности компонентов при нормальном атмосферном давлении и температуре 40 °С.

Задача 2.11. Генераторный газ состоит по объему из 18 % водорода, 3 % метана, 24 % угарного газа, 6 % углекислого газа и 49 % азота. Определить массовый состав, среднюю молекулярную массу, газовую постоянную, плотность смеси и парциальные давления газов при давлении 993 гПа и температура 15 °С.

Задача 2.12. Определить массовый состав и среднюю молекулярную массу газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если парциальное давление углекислого газа в ней 1,2 бар, а общее давление смеси 3,5 бар.

Задача 2.13. Определить давление, до которого нужно сжать газовую смесь, состоящую по массе из 18 % углекислого газа, 6 % кислорода и 76 % азота, чтобы при температуре 54 °F плотность ее составила 1,65 кг/м³.

Задача 2.14. Газовая смесь, состоящая по объему из 10 % водорода, 6 % кислорода, 12 % метана, 15 % угарного газа, 8 % углекислого газа и 49 % азота, имеющая массу 8 кг, занимает при температуре 120 °С объем 4 м². Определить давление смеси и парциальные давления ее компонентов.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Теоретическое введение

Теплоемкость является одним из важнейших теплофизических параметров вещества, широко используемым при расчетах, связанных с определением количества теплоты. Теплоемкость C представляет собой количество тепла, которое необходимо сообщить термодинамической системе для повышения ее температуры на один градус. Как правило, при вычислениях используется величина удельной теплоемкости (отнесенной к единице рабочего тела), понятие полной теплоемкости практического применения не находит.

Удельной теплоемкостью в общем случае называется такое количество тепла, которое необходимо сообщить какой-либо единице вещества для повышения его температуры на один градус. В зависимости от того, что именно принимается за единицу вещества, различают три вида удельной теплоемкости: массовую, объемную и мольную.

Массовая теплоемкость c – количество тепла, которое необходимо сообщить единице массы вещества (одному килограмму) для повышения его температуры на один градус. Измеряется массовая теплоемкость в $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Объемная теплоемкость c' – количество тепла, которое необходимо сообщить единице объема вещества (одному кубическому метру) для повышения его температуры на один градус. Измеряется объемная теплоемкость в $\text{Дж/м}^3\cdot\text{град}$. Для газов, как правило, величина объемной теплоемкости относится к кубическому метру газа при нормальных физических условиях и измеряется в $\text{Дж/м}_n^3\cdot\text{град}$.

Мольная теплоемкость μc – количество тепла, которое необходимо сообщить единице количества вещества (одному молю) для повышения его температуры на один градус. Измеряется мольная теплоемкость в $\text{Дж/моль}\cdot\text{град}$.

Значения массовой и объемной теплоемкости связаны соотношением

$$c = c' \cdot \nu = \frac{\mu c}{\mu}, \quad (3.1)$$

где ν – удельный объем газа при нормальных условиях, $\text{м}^3/\text{кг}$; μ – молекулярная масса газа, кг/моль .

В общем случае величина теплоемкости зависит от физических свойств вещества, от характера протекания термодинамического процесса, для идеальных газов – от температуры, а для реальных газов – также и от давления.

В зависимости от характера термодинамического процесса различают два вида теплоемкости: изобарную теплоемкость c_p , c_p' , μc_p – теплоемкость в изобарном процессе, то есть протекающем при постоянном давлении ($p = \text{const}$)

и изохорную теплоемкость c_v , c_v' , μc_v – теплоемкость в изохорном процессе, то есть протекающем при постоянном объеме ($V = const$).

Между изобарной и изохорной теплоемкостями существует связь, выражаемая уравнением, которое носит название уравнения Майера:

$$c_p - c_v = R. \quad (3.2)$$

Также различают понятия истинной и средней теплоемкости.

Истинной теплоемкостью называется такое элементарное (бесконечно малое) количество теплоты dq , которое при подведении к единице рабочего тела вызывает повышение его температуры на бесконечно малую величину dT :

$$c = \frac{dq}{dT}. \quad (3.3)$$

На практике наиболее часто используется понятие средней теплоемкости, соответствующее подводу теплоты к рабочему телу в определенном конечном интервале температур. Средней теплоемкостью в некотором интервале температур называют количество теплоты, подводимое к единице рабочего тела для изменения его температуры в среднем на один градус из этого интервала. Определяется средняя теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 как отношение всего подведенного на этом интервале удельного количества теплоты q_{1-2} ко всей разности температур $t_2 - t_1$:

$$c|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}. \quad (3.4)$$

Связь между средней и истинной теплоемкостями в некотором процессе устанавливается уравнением

$$c|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt. \quad (3.5)$$

Значения средних теплоемкостей приводятся в справочных таблицах для интервала температур от 0 до t . Тогда средняя теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 может быть вычислена по формуле

$$c|_{t_1}^{t_2} = \frac{c|_0^{t_2} \cdot t_2 - c|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}. \quad (3.6)$$

С учетом понятия средней теплоемкости количество теплоты может быть рассчитано как

$$Q = m \cdot c'_{t_1}{}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ Вт}, \quad (3.7)$$

где m – массовый расход рабочего тела, кг/с ; $c'_{t_1}{}^{t_2}$ – средняя массовая теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 , $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$; или

$$Q = v \cdot c'_{t_1}{}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ Вт}, \quad (3.8)$$

где v – объемный расход рабочего тела, $\text{м}^3/\text{с}$; $c'_{t_1}{}^{t_2}$ – средняя объемная теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 , $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Формулы, приведенные выше, могут быть преобразованы следующим образом:

$$Q = m \cdot (c'_{0}{}^{t_2} \cdot t_2 - c'_{0}{}^{t_1} \cdot t_1) \quad (3.9)$$

и

$$Q = v \cdot (c'_{0}{}^{t_2} \cdot t_2 + c'_{0}{}^{t_1} \cdot t_1), \quad (3.10)$$

где $c'_{0}{}^{t_1}$, $c'_{0}{}^{t_2}$, $c'_{0}{}^{t_1}$, $c'_{0}{}^{t_2}$ – соответственно значения средней массовой и объемной теплоемкости в интервале температур от 0 до t_1 и от 0 до t_2 .

Значения средней массовой и объемной теплоемкости некоторых газов приводятся в приложениях В, Г, Д, Е.

Для приближенных расчетов иногда пользуются эмпирическими формулами, учитывающими зависимость теплоемкости от температуры по линейному закону. Для истинной теплоемкости эта зависимость может быть представлена уравнением вида

$$c = a + bt, \quad (3.11)$$

где a – величина истинной теплоемкости при 0 °С; b – тангенс угла наклона прямой, характеризующей изменение теплоемкости от температуры.

Зная зависимость истинной теплоемкости от температуры, можно определить величину средней теплоемкости:

$$c|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt = a + \frac{b}{2}(t_2 + t_1). \quad (3.12)$$

Уравнения для расчета средних массовых и объемных теплоемкостей газов в пределах от 0 до 1500 °С приведены в таблице (приложение Ж).

Часто при расчетах требуется определять значение теплоемкости газовых смесей. Если смесь задана массовыми долями, то массовая теплоемкость смеси

$$c_{pсм.} = \sum g_i \cdot c_{p_i} \quad (3.13)$$

и

$$c_{vсм.} = \sum g_i \cdot c_{v_i} \quad (3.14)$$

Если смесь задана объемными долями, то объемная теплоемкость смеси

$$c'_{pсм.} = \sum r_i \cdot c'_{p_i} \quad (3.15)$$

и

$$c'_{vсм.} = \sum r_i \cdot c'_{v_i} \quad (3.16)$$

Задачи

Задача 3.1. Определить при помощи таблиц значение средней объемной теплоемкости воздуха при постоянном давлении в интервале температур от 0 °С до 500 °С.

Задача 3.2. Определить при помощи таблиц значение средней массовой теплоемкости азота при постоянном давлении в интервале температур от 200 °С до 700 °С.

Задача 3.3. Определить при помощи таблиц значение средней массовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме в интервале температур от 1200 °С до 800 °С.

Задача 3.4. Определить при помощи таблиц значения средней объемной теплоемкости углекислого газа при постоянном давлении и при постоянном объеме в интервале температур от 350 °С до 1100 °С.

Задача 3.5. Определить при помощи таблиц значения средней объемной и массовой теплоемкости водорода при постоянном давлении и при постоянном объеме в интервале температур от 675 °C до 1450 °C.

Задача 3.6. Газовая смесь состоит из 0,25 кг водорода, 1,75 кг угарного газа, 3,25 кг углекислого газа и 5,75 кг азота. Определить при помощи таблиц значения средней объемной теплоемкости смеси при постоянном давлении в интервале температур от 450 °C до 1500 °C.

Задача 3.7. Газовая смесь состоит по массе из 7 % водорода, 18 % водяного пара, 26 % углекислого газа и 49 % азота. Определить при помощи таблиц значения средней массовой и объемной теплоемкости смеси при постоянном давлении и при постоянном объеме в интервале температур от 150 °C до 850 °C.

Задача 3.8. Газовая смесь состоит по объему из 18 % водяного пара, 3 % кислорода, 14 % угарного газа, 16 % углекислого газа и 49 % азота. Определить при помощи таблиц значения средней массовой теплоемкости смеси при постоянном давлении и при постоянном объеме в интервале температур от 750 °C до 1650 °C.

Задача 3.9. Считая зависимость теплоемкости от температуры линейной, рассчитать значение средней массовой и объемной изобарной теплоемкости водяного пара в интервале температур от 257 °C до 785 °C.

Задача 3.10. Рассчитать значения средней массовой изобарной и изохорной теплоемкости азота в интервале температур от 450 °C до 1200 °C, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной и нелинейной, определить погрешность.

Задача 3.11. Рассчитать количество тепла, подводимого при нагревании при постоянном давлении 5,5 кг/с водяного пара от 200 °C до 800 °C, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной и нелинейной, определить погрешность.

Задача 3.12. Рассчитать количество тепла, отводимого при охлаждении при постоянном объеме 1,8 м³/с газовой смеси, состоящей по массе из 38 % водяного пара и 62 % углекислого газа, в интервале температур от 1400 °C до 100 °C, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной и нелинейной, определить погрешность.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМИ ГАЗАМИ

Теоретическое введение

К основным термодинамическим процессам с идеальными газами, имеющим большое значение для практических работ в технике, относятся: изобарный, протекающий при постоянном давлении; изохорный, протекающий при постоянном объеме; изотермический, протекающий при постоянной температуре; адиабатный, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Кроме того, существует группа процессов, характеризующихся постоянным значением теплоемкости, называемых политропными и являющихся при определенных условиях обобщающими для всех других процессов.

1. Изобарный процесс.

Изобарный процесс – процесс, протекающий при постоянном давлении:
 $p = const.$

Уравнение процесса:

$$\frac{v}{T} = const. \quad (4.1)$$

Изображение изобарного процесса в pv - и Ts -диаграммах приведено на рисунке 4.1.

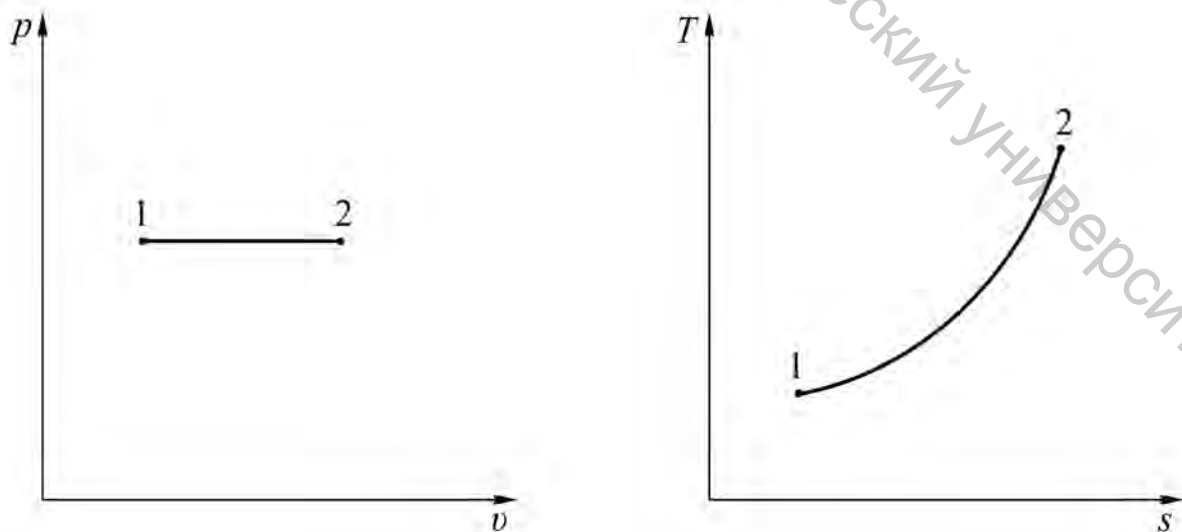


Рисунок 4.1 – Изобарный процесс

Соотношение параметров:

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (4.2)$$

Параметры процесса: количество тепла

$$q = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.3)$$

работа

$$l = \int_{\nu_1}^{\nu_2} p d\nu = p \cdot (\nu_2 - \nu_1) = R \cdot (T_2 - T_1); \quad (4.4)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.5)$$

изменение энтальпии

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1) = q; \quad (4.6)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \cdot \ln \frac{\nu_2}{\nu_1}. \quad (4.7)$$

2. Изохорный процесс.

Изохорный процесс – процесс, протекающий при постоянном объеме:
 $v = const$.

Уравнение процесса:

$$\frac{p}{T} = const. \quad (4.8)$$

Изображение изохорного процесса в $p\nu$ - и Ts -диаграммах приведено на рисунке 4.2.

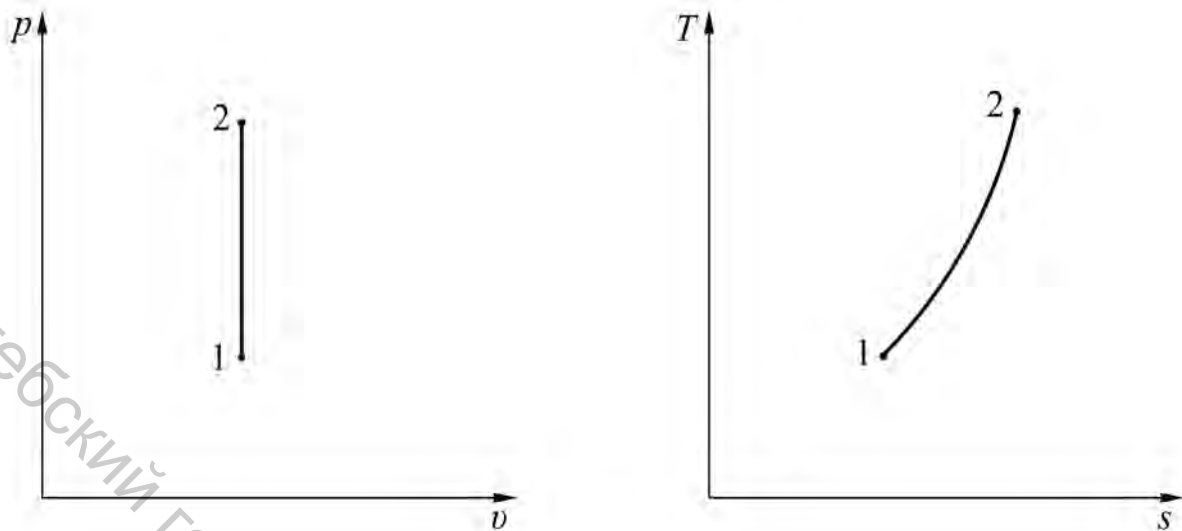


Рисунок 4.2 – Изохорный процесс

Соотношение параметров:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.9)$$

Параметры процесса: количество тепла

$$q = c_v \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.10)$$

работа

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0; \quad (4.11)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = q; \quad (4.12)$$

изменение энтальпии

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.13)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (4.14)$$

3. Изотермический процесс.

Изотермический процесс – процесс, протекающий при постоянной температуре: $T = const$.

Уравнение процесса:

$$p\nu = const. \quad (4.15)$$

Изображение изотермического процесса в $p\nu$ - и Ts -диаграммах приведено на рисунке 4.3.

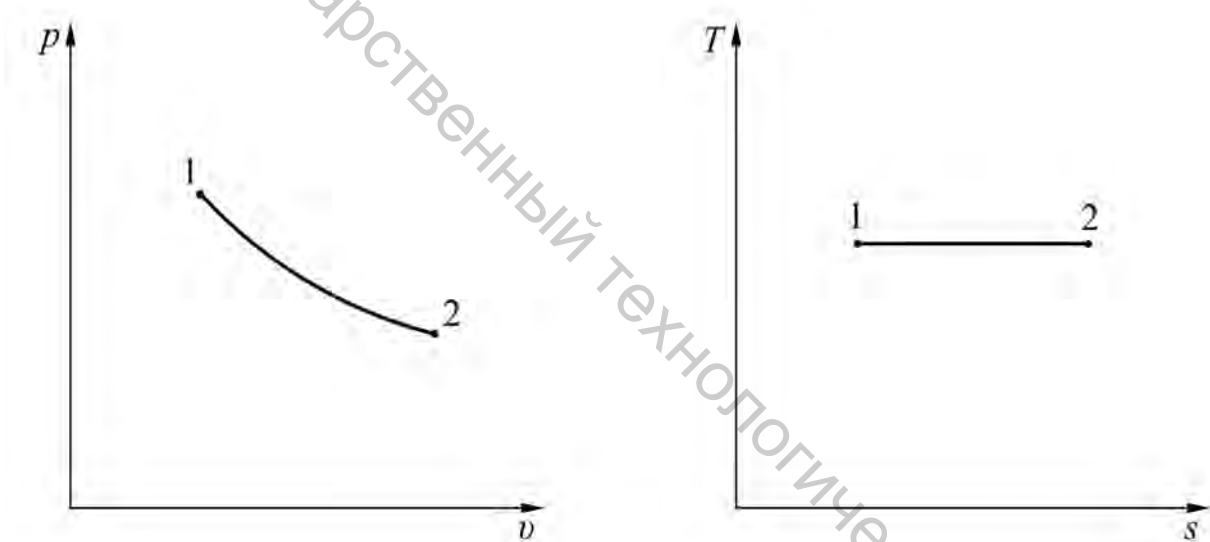


Рисунок 4.3 – Изотермический процесс

Соотношение параметров:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (4.16)$$

Параметры процесса: количество тепла

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds = T \cdot (s_2 - s_1) = RT \cdot \ln \frac{\nu_2}{\nu_1} = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 \nu_1 \cdot \ln \frac{\nu_2}{\nu_1}; \quad (4.17)$$

работа

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = q; \quad (4.18)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = 0; \quad (4.19)$$

изменение энтальпии

$$\Delta i = 0; \quad (4.20)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (4.21)$$

4. Адиабатный процесс.

Адиабатный процесс – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $dq = 0$.

Уравнение процесса:

$$p v^k = const, \quad (4.22)$$

где k – показатель адиабаты:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = 1,33 \div 1,66, \quad (4.23)$$

в зависимости от атомарности газа.

Изображение адиабатного процесса в $p v$ - и $T s$ -диаграммах приведено на рисунке 4.4.

Соотношение параметров:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k, \quad (4.24)$$

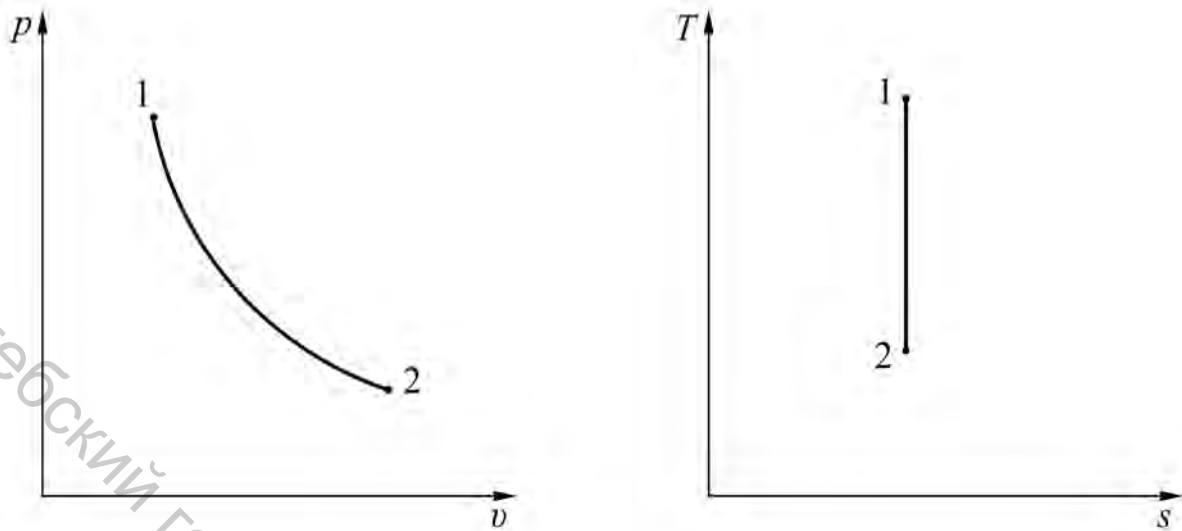


Рисунок 4.4 – Адиабатный процесс

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (4.25)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (4.26)$$

Параметры процесса: количество тепла

$$q = 0; \quad (4.27)$$

работа

$$l = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 \nu_1 - p_2 \nu_2) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = c_v \cdot (T_1 - T_2); \quad (4.28)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = -l; \quad (4.29)$$

изменение энтальпии

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.30)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = 0. \quad (4.31)$$

5. Политропный процесс.

Политропный процесс – процесс, протекающий при некотором постоянном значении теплоемкости: $c = const$. Теплоемкость политропного процесса может принимать самые разнообразные значения в пределах от $-\infty$ до $+\infty$.

Уравнение процесса:

$$p v^n = const, \quad (4.32)$$

где n – показатель политропы:

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}, \quad (4.33)$$

где c_n – теплоемкость в политропном процессе

$$c_n = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1}. \quad (4.34)$$

Соотношение параметров:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n, \quad (4.35)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4.36)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (4.37)$$

Параметры процесса: количество тепла

$$q = c_n \cdot (t_2 - t_1) = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.38)$$

работа

$$l = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2); \quad (4.39)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.40)$$

изменение энтальпии

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1); \quad (4.41)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = c_n \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (4.42)$$

Все ранее рассмотренные термодинамические процессы являются частными случаями политропного процесса, если они протекают при постоянной теплоемкости.

Тогда:

- для изобарного процесса $n = 0$, $c_n = c_p$;
- для изохорного процесса $n = \pm \infty$, $c_n = c_v$;
- для изотермического процесса $n = 1$, $c_n = \pm \infty$;
- для адиабатного процесса $n = k$, $c_n = 0$.

Для произвольного количества газа параметры могут быть определены по формулам $Q = q \cdot m$, $L = l \cdot m$ и так далее, где m – масса газа.

Задачи

Задача 4.1. Азот нагревается при постоянном давлении, в результате чего температура его повышается с 200 °С до 700 °С. Определить работу, совершаемую газом, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной, линейной и считая теплоемкость постоянной, соответствующей нормальным условиям.

Задача 4.2. Углекислый газ в количестве 10 кг, в начальном состоянии при температуре 17 °С имеющий давление 1,25 атм, изобарно нагревается до 330 °С. Определить начальный и конечный объем, количество подведенного тепла, работу, изменение внутренней энергии и энтропии газа, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Задача 4.3. Определить количество подведенного тепла и работу, совершаемую при нагревании $2,5 \text{ м}^3$ воздуха при постоянном избыточном давлении $1,85 \text{ ат}$ от $100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $500 \text{ }^\circ\text{C}$, если атмосферное давление составляет 745 мм рт. ст. , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Задача 4.4. В баллоне объемом 120 л находится этилен при абсолютном давлении $1,25 \text{ МПа}$ и температуре $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить конечное давление, количество подведенного тепла, изменение энтальпии и энтропии при повышении температуры воздуха на $115 \text{ }^\circ\text{C}$, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Задача 4.5. До какого давления следует заряжать пусковой баллон двигателя внутреннего сгорания, если температура воздуха в баллоне при зарядке $147 \text{ }^\circ\text{C}$, а после остывания до $15 \text{ }^\circ\text{C}$ давление должно составлять 32 бар ? Определить количество тепла, теряемое воздухом в процессе охлаждения, если объем баллона 90 л .

Задача 4.6. Сравнить количества тепла, необходимые для нагревания 5 кг азота от 25 до $225 \text{ }^\circ\text{C}$ при постоянном объеме и при постоянном давлении. Для изобарного процесса определить также работу расширения.

Задача 4.7. К воздуху в количестве $0,15 \text{ м}^3$ при начальном давлении 10 бар и начальной температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$ подводится $0,125 \text{ МДж}$ тепла. Определить конечное давление и конечный объем воздуха, если температура его при этом не изменилась.

Задача 4.8. Кислород с начальным давлением $1,2 \text{ бар}$ сжимается при постоянной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, в результате его объем уменьшается в 5 раз. Определить работу сжатия газа.

Задача 4.9. 8 м^3 азота с начальным давлением $0,9 \text{ ат}$ и температурой $25 \text{ }^\circ\text{C}$ сжимаются изотермически до $7,5 \text{ ат}$. Определить конечный объем газа, затраченную работу и количество отведенного тепла.

Задача 4.10. Воздух в количестве $2,8 \text{ кг}$, занимающий при начальном давлении 10 бар объем $0,248 \text{ м}^3$, расширяется до 8-кратного увеличения объема. Определить конечное давление воздуха, совершаемую им работу и количество тепла при изотермическом и адиабатном процессе расширения.

Задача 4.11. Из сосуда, в котором содержится углекислый газ при давлении 12 бар и температуре $18 \text{ }^\circ\text{C}$, вытекает $\frac{2}{3}$ содержимого. Определить конечное давление и температуру газа, если процесс истечения был адиабатным.

Задача 4.12. Водород с начальной температурой $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, адиабатно расширяясь, охлаждается до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом его давление понижается до 1 ат . Определить начальное давление и работу расширения газа.

Задача 4.13. Газовая смесь, состоящая по массе из 37% угарного газа и 63% углекислого газа, и имеющая начальный объем $3,25\text{ м}^3$ и начальную температуру $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении 752 мм рт. ст. , сжимается адиабатно до давления 6 атм . Определить конечную температуру смеси и затраченную работу.

Задача 4.14. Сернистый газ массой $2,75\text{ кг}$, в начальном состоянии имеющий давление 4 бар и температуру $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, расширяется до давления 1 бар . Определить начальный и конечный объем, работу расширения, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии газа для случаев, когда процесс протекает адиабатно и политропно с показателем политропы $1,2$.

Задача 4.15. Водород с начальным давлением $1,05\text{ бар}$ и начальной температурой $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ сжимается политропно до давления $7,5\text{ бар}$. Определить начальный и конечный удельный объем, затраченную работу, количество тепла и изменение внутренней энергии, если показатель политропы равен $1,25$.

Задача 4.16. В политропном процессе температура воздуха уменьшается с $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Начальное давление составляет 5 бар . Определить изменение внутренней энергии и энтропии воздуха, если в рассматриваемом процессе к нему подводится 60 кДж/кг тепла.

Задача 4.17. Воздух, в начальном состоянии при давлении 4 бар и температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеющий объем 5 м^3 , политропно расширяется до давления 1 бар , при этом его объем увеличивается до 16 м^3 . Определить показатель политропы, работу расширения, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии газа.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ, ДИАГРАММЫ И ТАБЛИЦЫ ВОДЯНОГО ПАРА

Теоретическое введение

Парами принято называть газообразное состояние веществ, в привычных условиях являющихся жидкостями. Таким образом, водяной пар – это вода, находящаяся в газообразном состоянии.

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется парообразованием. Различают два случая этого процесса: испарение и кипение. Испарение – процесс парообразования, который протекает практически при любых условиях со свободной поверхности жидкости (поверхности, соприкасающейся с окружающей средой). Кипение – процесс парообразования, начинающийся сразу по всей толще жидкости, к которой подводится тепло, при достижении определенной температуры, называемой температурой кипения (или температурой насыщения). Температура кипения зависит от вида жидкости и от давления, под которым эта жидкость находится. Так, для воды при нормальном атмосферном давлении температура кипения составляет 100 °С. При повышении давления эта температура будет увеличиваться, при понижении давления – уменьшаться.

Состояние водяного пара, как и любого вещества, можно охарактеризовать тремя основными термодинамическими параметрами состояния: давлением p , температурой t и удельным объемом v .

Различают два состояния водяного (и любого другого) пара: насыщенный и перегретый. Насыщенным называется пар, соприкасающийся с жидкостью и находящийся с ней в состоянии термического равновесия. Такой пар получается непосредственно в результате кипения жидкости. Перегретый пар – это пар, температура которого выше температуры насыщенного пара при данном давлении. Для получения перегретого пара необходимо к насыщенному пару, предварительно отделив его от жидкости, подводить дополнительное тепло. Температура и давление насыщенного пара однозначно связаны между собой, то есть по температуре насыщенного пара можно определить его давление и наоборот. Между параметрами перегретого пара такой связи не существует, все три основных термодинамических параметра его состояния являются взаимно независимыми.

В свою очередь, различают насыщенный пар сухой и влажный. Сухой насыщенный пар – это пар, в котором полностью отсутствует жидкость. Влажный насыщенный пар – пар, содержащий некоторое количество жидкости, его можно представить как смесь сухого насыщенного пара и равномерно в нем распределенных мелкодисперсных частиц жидкости. В соответствии с этим, для насыщенного пара вводится параметр, называемый степенью сухости. Степень сухости насыщенного пара x представляет собой отношение массы

сухого насыщенного пара, содержащегося во влажном, ко всей массе влажного насыщенного пара:

$$x = \frac{m_{n. \text{ сух.}}}{m_{n. \text{ вл.}}} = \frac{m_{n. \text{ сух.}}}{m_{n. \text{ сух.}} + m_{ж}}. \quad (5.1)$$

Из формулы (5.1) видно, что значение степени сухости $x = 0$ соответствует началу процесса кипения, то есть состоянию кипящей жидкости, значение $x = 1$ – окончанию процесса кипения, то есть состоянию сухого насыщенного пара. Все промежуточные значения степени сухости ($0 < x < 1$) будут соответствовать состоянию влажного насыщенного пара, то есть смеси, содержащей как газообразную, так и жидкую фазу. Если рассматривать некоторый элементарный объем вещества, то в процессе кипения его степень сухости будет постепенно увеличиваться от 0 до 1. Процесс кипения является изобарно-изотермическим, то есть при постоянном давлении он протекает с постоянной температурой.

При рассмотрении параметров водяного пара приняты следующие обозначения, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Обозначения параметров воды и водяного пара

Параметры	Состояние
v_0, i_0, \dots	жидкость при температуре плавления
v', i', \dots	кипящая жидкость
v_x, i_x, \dots	влажный насыщенный пар
v'', i'', \dots	сухой насыщенный пар

Водяной пар, являющийся реальным газом, по своим свойствам сильно отличается от идеального газа, параметры его состояния определить аналитическим путем, используя уравнение состояния, невозможно. На практике определение параметров состояния водяного пара чаще всего осуществляется графическим методом, основанным на использовании i -диаграммы водяного пара. Также могут быть использованы таблицы параметров воды и водяного пара.

Таблицы параметров воды и водяного пара могут применяться как непосредственно для определения значения различных величин, характеризующих состояние воды и водяного пара, так и при построении диаграмм. Таблицы составляются для кипящей воды и сухого насыщенного пара (таблицы насыщенного пара), а также для некипящей воды и перегретого пара (таблицы перегретого пара).

Наиболее широкое распространение получили таблицы насыщенного водяного пара. В зависимости от того, что принимается в качестве исходного

параметра, различают два вида таких таблиц: составленные по давлению и по температуре. В таблицах насыщенного пара, составленных по давлению (приложение И), для различных значений давления p приведены соответствующие значения температуры насыщенного пара t_n , удельных объемов v' и v'' , энтальпий i' и i'' , удельной теплоты парообразования r и энтропий s' и s'' . В таблицах, составленных по температуре (приложение К), для различных значений температуры t приведены соответствующие значения давления насыщенного пара p_n , удельных объемов v' и v'' , энтальпий i' и i'' , удельной теплоты парообразования r и энтропий s' и s'' . Параметры кипящей воды или сухого насыщенного водяного пара определяются непосредственно по таблицам. Учитывая линейный характер изменения параметров в области насыщенного пара, значения параметров влажного насыщенного пара (удельного объема v_x , энтальпии i_x и энтропии s_x) могут быть найдены с использованием табличных значений по следующим формулам:

$$v_x = v' \cdot (1 - x) + v'' \cdot x; \quad (5.2)$$

$$i_x = i' + r \cdot x; \quad (5.3)$$

$$s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_n}. \quad (5.4)$$

Поскольку какой-либо закономерности изменения параметров перегретого пара не существует, в таблицах перегретого пара дана градация значений давления и температуры, и для каждой пары значений этих параметров приведены соответствующие значения энтальпии, энтропии и удельного объема. Такие таблицы широкого распространения не получили и используются крайне ограниченно.

При построении is -диаграммы водяного пара (рис. 5.1) по вертикальной оси откладываются значения удельной энтальпии i , в настоящее время выражаемой, как правило, в $кДж/кг$, а по горизонтальной оси – значения удельной энтропии s , выражаемой в $кДж/кг \cdot град$. За начало координат принимается состояние воды в тройной точке. На диаграмму прежде всего наносят нижнюю и верхнюю пограничные кривые, сходящиеся в критической точке K . Нижняя пограничная кривая (пограничная кривая жидкости $x = 0$) выходит из начала координат, так как в этой точке значения энтальпии и энтропии принимают равными нулю. Слева от нижней пограничной кривой – линии AK – находится область жидкости I ; между нижней и верхней пограничными кривыми расположена область насыщенного пара II ; над верхней пограничной кривой (пограничной кривой пара $x = 1$) – линией KB – лежит область перегретого пара III .

В области насыщенного пара наносится сетка линий постоянной степени сухости пара ($x = const$), которые выходят из критической точки K . Линии

постоянного давления ($p = const$) – изобары и линии постоянной температуры ($t = const$) – изотермы в области насыщенного пара совпадают и являются прямыми наклонными линиями, расходящимися веером от нижней пограничной кривой. В области перегретого пара эти линии расходятся: изобары поднимаются вверх и имеют кривизну с выпуклостью, обращенной вниз; изотермы уходят в сторону и представляют собой кривые линии, обращенные выпуклостью вверх. Также на диаграмму наносится сетка изохор ($v = const$), которые поднимаются вверх более круто по сравнению с изобарами и, как правило, изображаются штриховыми линиями, чтобы легко отличать их от других линий.

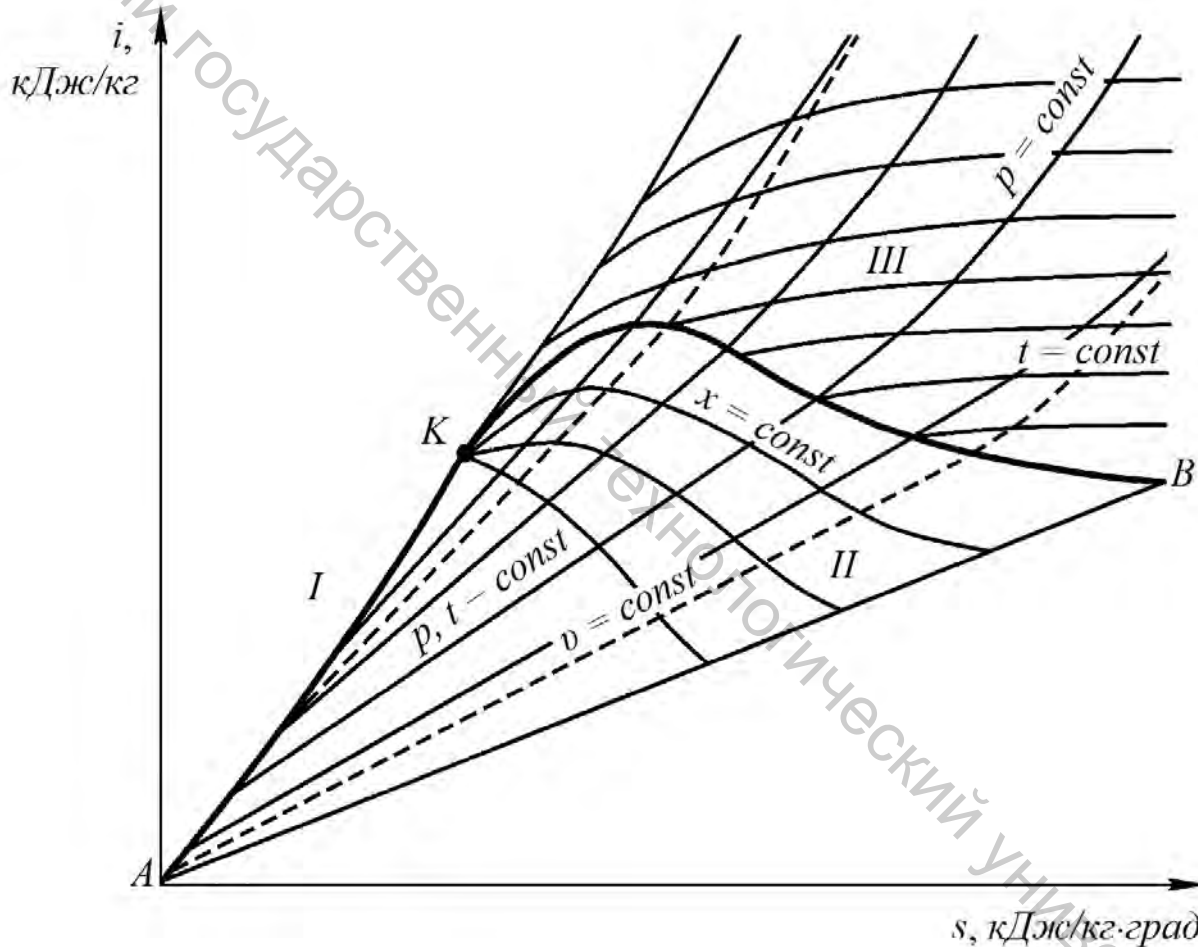


Рисунок 5.1 – is -диаграмма водяного пара

Для практических целей обычно используют только наиболее востребованную верхнюю правую часть is -диаграммы водяного пара, что дает возможность определять параметры пара с точностью, достаточной для технических расчетов.

Использование is -диаграммы позволяет решать ряд практических задач. С

ее помощью можно по двум известным параметрам пара определить значения его остальных параметров. Пересечение линий, соответствующих значениям заданных параметров, дает точку, соответствующую данному состоянию пара. Величина всех остальных параметров находится по соответствующим линиям, проходящим через данную точку.

Пользуясь этой диаграммой, можно также определить изменение параметров пара при любом процессе изменения его состояния.

Задачи

Задача 5.1. Используя таблицы, определить основные параметры (температуру, удельный объем, энтальпию, энтропию) насыщенного водяного пара, если при давлении 28 бар он имеет степень сухости $0,68$.

Задача 5.2. Используя таблицы, определить основные параметры (давление, удельный объем, энтальпию, энтропию) насыщенного водяного пара, если при температуре $260 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет степень сухости $0,72$.

Задача 5.3. Используя таблицы, определить основные параметры (температуру, степень сухости, энтальпию, энтропию) насыщенного водяного пара, если при давлении 12 бар он имеет удельный объем $0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 5.4. Используя таблицы, определить основные параметры (давление, степень сухости, удельный объем, энтропию) насыщенного водяного пара, если при температуре $320 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет энтальпию 2400 кДж/кг .

Задача 5.5. Используя is -диаграмму водяного пара, определить основные параметры (температуру, удельный объем, энтальпию, энтропию) пара, если при давлении 3 бар он имеет степень сухости $0,83$.

Задача 5.6. Используя is -диаграмму водяного пара, определить основные параметры (давление, удельный объем, энтальпию, энтропию) пара, если при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет степень сухости $0,87$.

Задача 5.7. Используя is -диаграмму водяного пара, определить основные параметры (степень сухости, температуру, удельный объем, энтропию) пара, если при давлении 6 бар он имеет энтальпию 2300 кДж/кг .

Задача 5.8. Используя is -диаграмму водяного пара, определить основные параметры (степень сухости, температуру, удельный объем, энтальпию) пара, если при давлении 2 бар он имеет энтропию $6,3 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$.

Задача 5.9. Используя is -диаграмму водяного пара, определить основные

параметры (степень сухости, температуру, энтальпию, энтропию) пара, если при давлении 8 бар он имеет удельный объем $0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 5.10. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (температуру, энтальпию, энтропию) пара, если при давлении 8 бар он имеет удельный объем $0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 5.11. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (удельный объем, энтальпию, энтропию) пара, если при давлении 15 бар он имеет температуру $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 5.12. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (удельный объем, энтальпию, энтропию) пара, если при давлении 45 бар он имеет температуру $530 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 5.13. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (температуру, удельный объем, энтропию) пара, если при давлении 35 бар он имеет энтальпию 3250 кДж/кг .

Задача 5.14. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (давление, удельный объем, энтальпию) пара, если при температуре $520 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет энтропию $7,3 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$.

Задача 5.15. Используя *is*-диаграмму водяного пара, определить основные параметры (давление, температуру, удельный объем) пара, если он имеет энтальпию 3500 кДж/кг и энтропию $7,7 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Теоретическое введение

К основным термодинамическим процессам с водяным паром, имеющим большое значение для практических работ в технике, относятся: изобарный, протекающий при постоянном давлении; изохорный, протекающий при постоянном объеме; изотермический, протекающий при постоянной температуре; адиабатный, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Поскольку водяной пар по своим свойствам существенно отличается от идеального газа, параметры, используемые при расчете процессов с водяным паром, определяются либо графически, с помощью is -диаграммы, либо с использованием таблиц водяного пара.

Основными параметрами термодинамического процесса являются: удельное количество участвующего в этом процессе тепла q , изменение удельной внутренней энергии Δu и совершаемая при этом удельная работа l . В соответствии с первым законом термодинамики

$$q = l + \Delta u. \quad (6.1)$$

Уравнение первого закона термодинамики справедливо для любого вещества и для любого процесса.

Количество тепла и работа в разных процессах могут рассчитываться по-разному, для определения же изменения внутренней энергии можно получить формулу, которая будет применима для любого процесса. В соответствии с определением, энтальпия равна сумме внутренней энергии и произведения давления на удельный объем:

$$i = u + p \cdot v, \quad (6.2)$$

откуда внутренняя энергия

$$u = i - p \cdot v. \quad (6.3)$$

Изменение внутренней энергии в каком-либо процессе

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - p_2 \cdot v_2 - (i_1 - p_1 \cdot v_1). \quad (6.4)$$

В некоторых случаях формулу (6.4) удобнее использовать в несколько ином виде:

$$\Delta u = i_2 - i_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1). \quad (6.5)$$

Для возможности расчета термодинамического процесса с водяным паром необходимо знать какие-либо два параметра хотя бы для одной из точек процесса, характер протекания этого процесса и один из параметров другой точки процесса. Вначале находится та точка, для которой известны два параметра, и определяются все остальные необходимые для расчета ее параметры. Затем, двигаясь из первой найденной точки по линии, соответствующей ходу протекания процесса до пересечения с линией известного параметра другой точки, находят эту точку и определяют ее параметры. Затем найденные таким образом параметры подставляют в соответствующие рассматриваемому процессу формулы.

1. Изобарный процесс ($p = const$).

Изображение изобарного процесса с водяным паром в is -диаграмме приведено на рисунке 6.1.

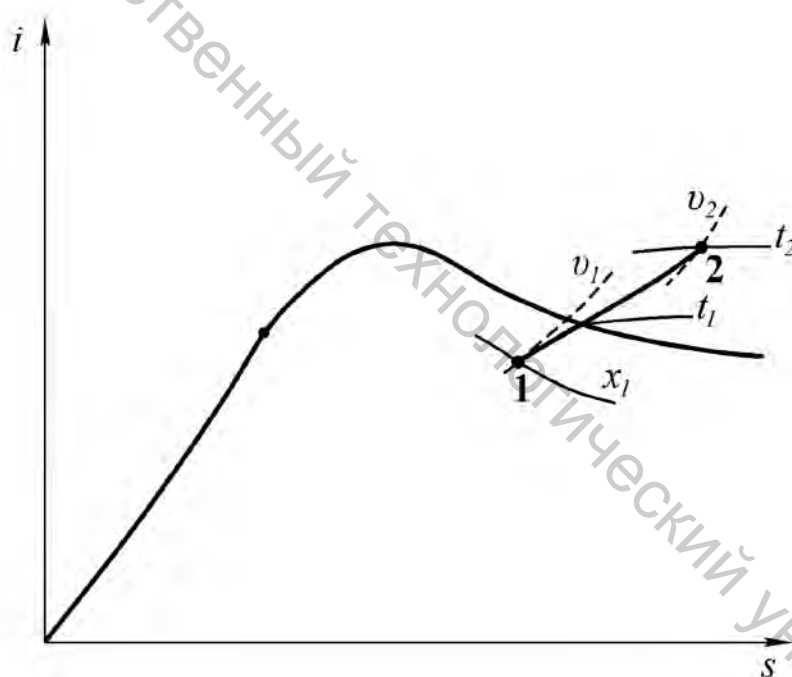


Рисунок 6.1 – Изображение изобарного процесса с водяным паром в is -диаграмме

Параметры процесса: количество тепла

$$q = i_2 - i_1, \quad (6.6)$$

изменение внутренней энергии, в соответствии с формулой (6.5) при $p_2 = p_1$

$$\Delta u = i_2 - i_1 - p \cdot (v_2 - v_1), \quad (6.7)$$

работа, из первого закона термодинамики

$$l = q - \Delta u = p \cdot (v_2 - v_1). \quad (6.8)$$

2. Изохорный процесс ($v = const$).

Изображение изохорного процесса с водяным паром в is -диаграмме приведено на рисунке 6.2.

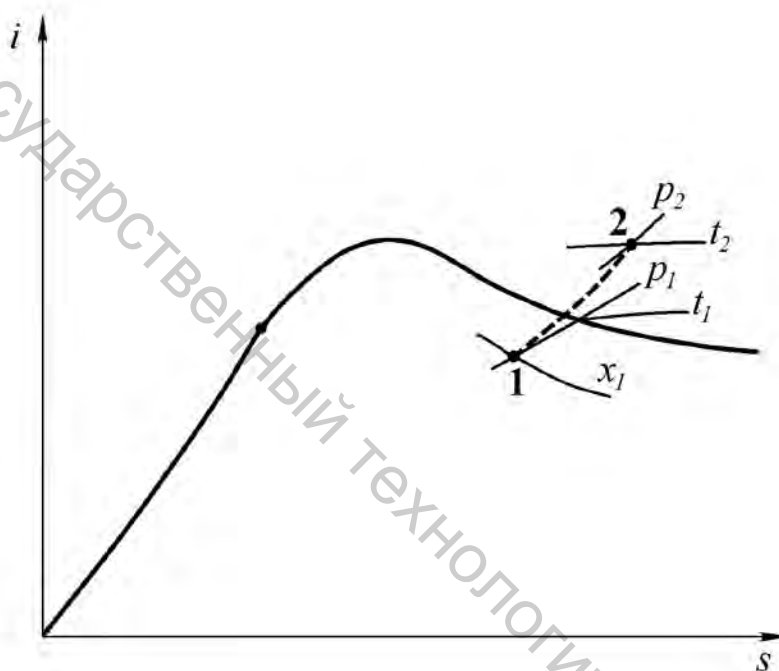


Рисунок 6.2 – Изображение изохорного процесса с водяным паром в is -диаграмме

Параметры процесса: работа в изохорном процессе не совершается,

$$l = 0, \quad (6.9)$$

следовательно, в соответствии с первым законом термодинамики, количество тепла и изменение внутренней энергии будут равны, и в соответствии с формулой (6.5) при $v_2 = v_1$

$$q = \Delta u = i_2 - i_1 - v \cdot (p_2 - p_1). \quad (6.10)$$

3. Изотермический процесс ($t = const$).

Изображение изотермического процесса с водяным паром в is -диаграмме приведено на рисунке 6.3.

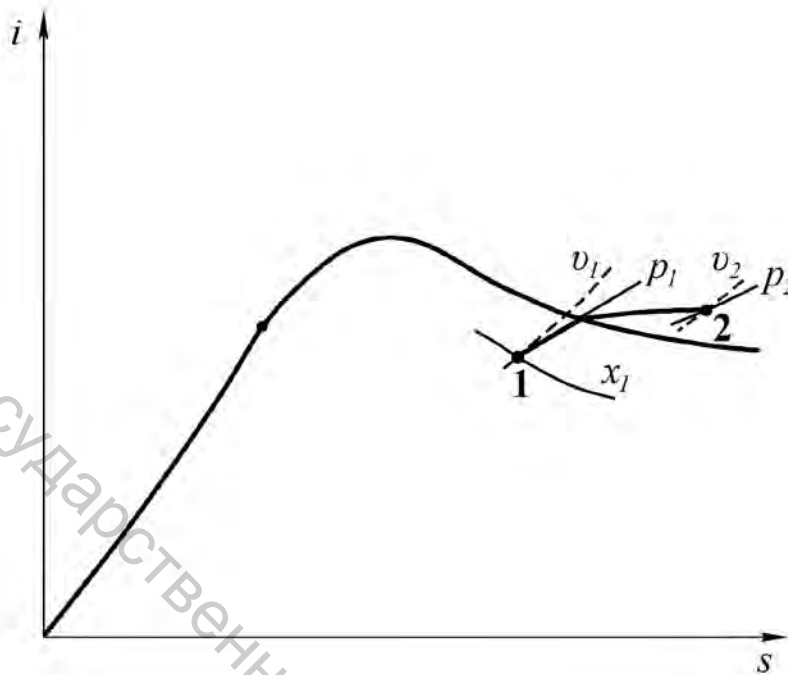


Рисунок 6.3 – Изображение изотермического процесса с водяным паром в is -диаграмме

Параметры процесса: количество тепла

$$q = T \cdot (s_2 - s_1), \quad (6.11)$$

изменение внутренней энергии, в соответствии с формулой (6.4)

$$\Delta u = i_2 - p_2 \cdot v_2 - (i_1 - p_1 \cdot v_1), \quad (6.12)$$

работа, согласно первому закону термодинамики

$$l = q - \Delta u. \quad (6.13)$$

4. Адиабатный изоэнтропный процесс ($dq = 0, s = const$).

Изображение адиабатного процесса с водяным паром в is -диаграмме приведено на рисунке 6.4.

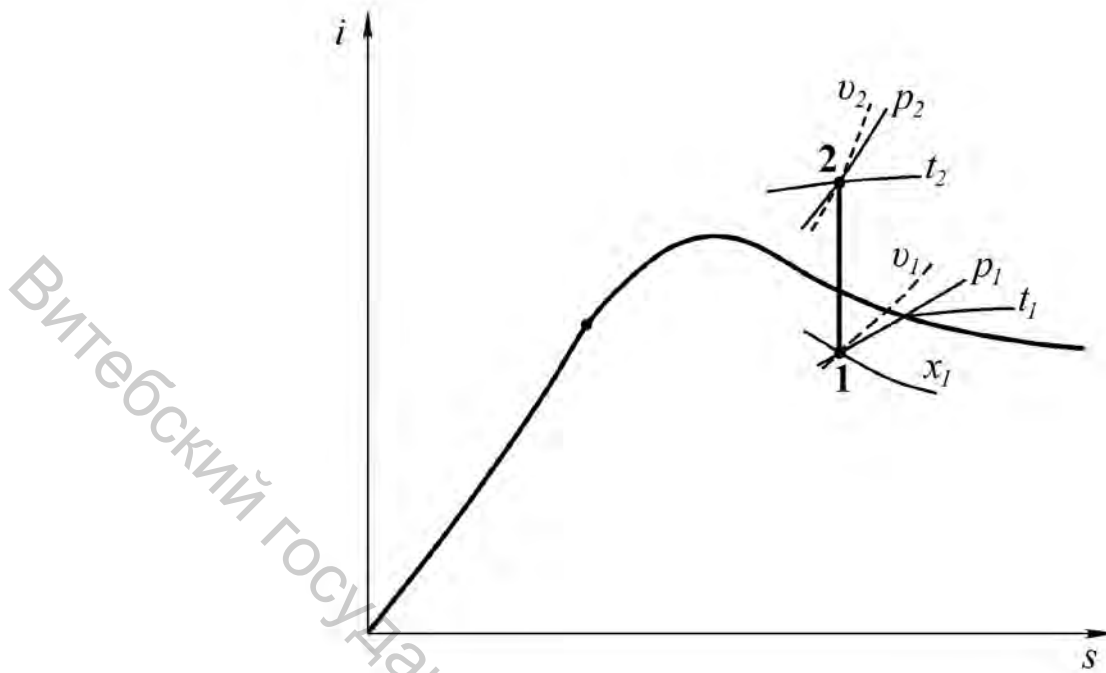


Рисунок 6.4 – Изображение адиабатного процесса с водяным паром в is -диаграмме

Параметры процесса: количество тепла

$$q = 0, \quad (6.14)$$

следовательно, изменение внутренней энергии и работа в адиабатном процессе, согласно первому закону термодинамики, будут одинаковы по величине и противоположны по знаку и в соответствии с формулой (6.4)

$$\Delta u = i_2 - p_2 \cdot v_2 - (i_1 - p_1 \cdot v_1) = -l. \quad (6.15)$$

Задачи

Задача 6.1. Водяной пар, имеющий в начальном состоянии температуру $480 \text{ }^\circ\text{C}$ и удельный объем $1 \text{ м}^3/\text{кг}$, охлаждается при постоянном давлении. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара, если в конце процесса он стал насыщенным со степенью сухости $0,98$.

Задача 6.2. Водяной пар, являющийся в начале процесса насыщенным со степенью сухости $0,8$ и имеющий при этом энтальпию 2400 кДж/кг , нагревается изобарно и становится в результате перегретым на $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара.

Задача 6.3. Водяной пар охлаждается при постоянном давлении, при этом его энтропия уменьшается на $1,15 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара, если в конце процесса он стал сухим насыщенным с температурой $210 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 6.4. На изобарный нагрев водяного пара, имеющего в начальном состоянии при температуре $250 \text{ }^\circ\text{C}$ степень сухости $0,96$, было затрачено 760 кДж/кг тепла. Определить основные начальные и конечные параметры, работу и изменение внутренней энергии пара в этом процессе.

Задача 6.5. Определить изменение внутренней энергии водяного пара при изохорном нагревании до температуры $590 \text{ }^\circ\text{C}$, если при этом его давление увеличилось с $0,9 \text{ МПа}$ до $1,6 \text{ МПа}$.

Задача 6.6. Водяной пар нагревается при неизменном объеме с $140 \text{ }^\circ\text{C}$ до $480 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить основные начальные и конечные параметры и изменение внутренней энергии пара, если его начальная степень сухости составляла $0,97$.

Задача 6.7. Водяной пар охлаждается при постоянном объеме с $620 \text{ }^\circ\text{C}$ до $370 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить основные начальные и конечные параметры и работу пара, если в начале процесса давление его было равно 5 МПа .

Задача 6.8. Определить основные параметры в начальном и конечном состоянии, количество тепла, работу и изменение внутренней энергии водяного пара в изохорном процессе, в начале которого пар был насыщенным и при температуре $170 \text{ }^\circ\text{C}$ имел степень сухости $0,82$, а в конце стал перегретым с температурой $460 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 6.9. Насыщенный водяной пар с начальным давлением 4 МПа и начальной степенью сухости $0,92$ расширяется при постоянной температуре до достижения удельного объема $1,2 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара.

Задача 6.10. Сухой насыщенный водяной пар, имеющий начальное давление $2,4 \text{ МПа}$, расширяется при постоянной температуре до достижения удельного объема $0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара в этом процессе.

Задача 6.11. Насыщенный водяной пар, в начальном состоянии при удельном объеме $0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ имеющий энтальпию 2400 кДж/кг , расширяется изотермически, в результате чего давление его понижается в 4 раза. Определить основные начальные и конечные параметры, количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара.

Задача 6.12. Перегретый водяной пар с начальным давлением $0,5 \text{ МПа}$ и начальным удельным объемом $0,45 \text{ м}^3/\text{кг}$ сжимается при постоянной температуре до достижения степени сухости $0,88$. Определить количество тепла, работу и изменение внутренней энергии пара в этом процессе.

Задача 6.13. В процессе сжатия водяного пара при постоянной температуре $250 \text{ }^\circ\text{C}$ от него было отведено 2400 кДж/кг тепла. Определить изменение внутренней энергии пара, если в конце процесса он стал насыщенным со степенью сухости $0,91$.

Задача 6.14. При адиабатном расширении водяного пара его давление понизилось на $3,5 \text{ МПа}$. Определить изменение внутренней энергии водяного пара, если в начале процесса при температуре $560 \text{ }^\circ\text{C}$ его удельный объем составлял $0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 6.15. Сухой насыщенный водяной пар, энтропия которого составляет $6,9 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$, сжимается адиабатно, при этом его давление возрастает в 4 раза. Определить основные начальные и конечные параметры и изменение внутренней энергии пара.

Задача 6.16. Водяной пар с начальным давлением 5 МПа и начальной температурой $350 \text{ }^\circ\text{C}$ расширяется адиабатно до давления $0,01 \text{ МПа}$. Определить основные начальные и конечные параметры и работу пара.

Задача 6.17. Насыщенный водяной пар, имеющий в начале процесса при температуре $150 \text{ }^\circ\text{C}$ степень сухости $0,93$, сжимается адиабатно до достижения удельного объема $0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить изменение внутренней энергии и конечную температуру пара.

Задача 6.18. Определить величину работы, затраченной на адиабатное сжатие водяного пара до давления $1,1 \text{ МПа}$, если его температура при этом возросла на $290 \text{ }^\circ\text{C}$ и достигла $560 \text{ }^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика : учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2017. – 502 с.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебное пособие для вузов / В. В. Нащокин ; под ред. В. С. Силецкого. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1975. – 495 с.
3. Техническая термодинамика : учебник для машиностроительных специальностей вузов / Е. В. Дрыжаков [и др.] ; под ред. В. И. Крутова. – Москва : Высшая школа, 1971. – 472 с.
4. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учебник для студентов строительных и энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования : в 2-х частях. Ч. 1 / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : УП Технопринт, 2004. – 486 с.
5. Цирельман, Н. М. Техническая термодинамика : учебное пособие. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 352 с.

Приложение А

Приставки для образования дольных и кратных единиц

Наименование приставки	Обозначение	Отношение к основной единице
Пико	<i>p</i>	10^{-12}
Нано	<i>n</i>	10^{-9}
Микро	<i>мк</i>	10^{-6}
Милли	<i>м</i>	10^{-3}
Сант	<i>с</i>	10^{-2}
Деци	<i>д</i>	10^{-1}
Дека	<i>да</i>	10^1
Гекто	<i>г</i>	10^2
Кило	<i>к</i>	10^3
Мега	<i>М</i>	10^6
Гига	<i>Г</i>	10^9
Тера	<i>Т</i>	10^{12}

Приложение Б

Физические свойства идеальных газов при нормальных условиях

Газ	Формула	μ , кг/кмоль	c_p , Дж/кг·град	R , Дж/кг·град	k
Азот	N ₂	28,026	1027	296,8	1,4
Аммиак	NH ₃	17,032	2056	488,3	1,33
Аргон	Ar	39,994	521	208,2	1,67
Воздух	—	28,96	1005	287,0	1,4
Водород	H ₂	2,016	14244	4124,0	1,4
Водяной пар	H ₂ O	18,016	1833	461,0	1,33
Гелий	He	4,003	5237	2078,0	1,67
Кислород	O ₂	32,00	920	259,8	1,4
Метан	CH ₄	16,032	2165	518,8	1,33
Сернистый газ	SO ₂	64,06	630	129,8	1,33
Угарный газ	CO	28,01	1030	296,8	1,4
Углекислый газ	CO ₂	44,01	873	188,9	1,33
Хлор	Cl ₂	70,914	471	117,2	1,4
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1528	296,6	1,33

Приложение В

Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давлении
 c_p , Дж/кг·град

t , °C	Воздух	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	1003,6	14195	914,8	1039,2	1039,6	814,8	1859,4
100	1006,1	14353	923,2	1040,4	1041,7	865,8	1872,8
200	1011,5	14421	935,3	1043,4	1046,3	910,2	1893,7
300	1019,2	14446	950,0	1048,8	1053,8	948,7	1919,2
400	1028,3	14477	965,1	1056,7	1063,4	982,6	1947,7
500	1038,7	14509	979,3	1066,0	1074,8	1012,8	1977,8
600	1049,6	14542	992,7	1076,0	1086,1	1039,6	2009,2
700	1060,5	14587	1004,8	1086,9	1097,8	1063,9	2041,9
800	1071,0	14641	1015,7	1097,4	1109,1	1085,2	2075,4
900	1081,5	14706	1025,8	1107,8	1120,0	1104,5	2109,7
1000	1090,7	14776	1035,0	1117,9	1130,4	1122,5	2143,6
1100	1099,9	14853	1043,4	1127,1	1140,1	1138,4	2177,1
1200	1108,2	14934	1050,9	1135,9	1149,3	1153,0	2210,6
1300	1116,6	15023	1058,0	1144,7	1157,7	1166,0	2242,9
1400	1124,2	15113	1064,7	1152,6	1165,6	1178,2	2274,3
1500	1133,3	15202	1071,4	1160,2	1173,1	1189,5	2304,8
1600	1138,0	15294	1077,3	1167,3	1179,8	1199,5	2334,6
1700	1144,3	15383	1083,1	1173,6	1186,5	1209,1	2363,0
1800	1150,1	15472	1088,6	1179,8	1192,4	1217,9	2390,7
1900	1156,0	15561	1094,0	1185,7	1198,3	1225,9	2416,6
2000	1161,0	15649	1099,0	1191,1	1203,3	1233,4	2442,2
2100	1166,4	15736	1104,1	1196,6	1208,3	1240,5	2466,4
2200	1171,0	15819	1108,7	1201,2	1212,9	1246,8	2489,5
2300	1175,7	15902	1113,7	1205,8	1217,5	1253,1	2512,1
2400	1180,3	15983	1118,3	1210,4	1221,7	1258,6	2533,4
2500	1184,0	16064	1122,9	1214,2	1225,9	1263,6	2554,4

Приложение Г

Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном объеме
 c_v , Дж/кг·град

t , °C	Воздух	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	716,4	10071	654,8	742,3	742,7	625,9	1398,0
100	719,3	10228	663,2	742,7	744,8	677,0	1411,4
200	724,3	10297	675,3	746,5	749,4	721,4	1432,3
300	731,9	10322	690,0	751,9	757,0	759,9	1457,4
400	741,5	10353	705,1	759,9	766,6	793,8	1486,3
500	751,9	10384	719,3	769,1	777,5	824,0	1516,0
600	762,4	10417	732,7	779,2	789,2	850,8	1547,4
700	773,3	10463	744,8	790,0	800,9	874,6	1580,5
800	784,2	10517	755,7	800,5	812,2	896,4	1614,0
900	794,2	10581	765,8	811,0	823,1	915,7	1648,3
1000	803,9	10652	775,0	821,0	833,6	933,2	1682,3
1100	812,7	10727	783,4	830,2	843,2	949,6	1715,8
1200	821,5	10809	791,3	839,5	856,6	963,8	1748,8
1300	829,4	10899	798,4	847,8	860,8	977,2	1781,5
1400	836,9	10988	805,1	855,8	868,8	989,3	1812,9
1500	844,1	11077	811,4	863,3	876,3	1000,6	1843,4
1600	850,8	11169	817,3	870,4	883,0	1010,7	1872,8
1700	857,0	11258	823,1	877,1	889,3	1020,3	1901,6
1800	863,3	11347	828,6	883,0	895,6	1029,1	1929,3
1900	868,8	11437	834,0	888,9	901,4	1037,1	1955,2
2000	874,2	11524	839,0	894,3	906,4	1044,6	1980,4
2100	879,2	11611	844,1	899,7	911,5	1051,7	2005,1
2200	884,3	11694	849,1	904,8	916,1	1058,0	2028,1
2300	888,9	11798	853,7	909,4	920,7	1063,9	2050,3
2400	893,0	11858	858,3	913,6	924,9	1069,7	2072,0
2500	897,2	11937	862,9	917,7	929,1	1074,8	2092,6

Приложение Д

Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении
 $c'_p, \text{Дж/м}^3 \cdot \text{град}$

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух	H_2	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O
0	1297,1	1276,6	1305,9	1298,7	1299,2	1599,8	1494,3
100	1300,4	1290,8	1317,6	1300,4	1301,7	1700,3	1505,2
200	1307,1	1297,1	1335,2	1303,8	1307,1	1737,3	1522,3
300	1317,2	1299,2	1356,1	1310,9	1316,7	1862,7	1542,4
400	1328,9	1302,1	1377,5	1320,5	1328,9	1929,7	1565,4
500	1342,7	1305,0	1398,0	1332,2	1342,7	1988,7	1589,7
600	1356,5	1308,0	1416,8	1345,2	1357,4	2041,1	1614,8
700	1370,8	1312,1	1434,4	1358,6	1372,0	2088,4	1641,2
800	1384,2	1316,7	1449,9	1371,6	1386,2	2131,1	1668,0
900	1397,6	1322,6	1464,5	1384,5	1399,6	2169,2	1695,7
1000	1409,7	1328,9	1477,5	1397,1	1412,6	2203,5	1722,9
1100	1421,4	1336,0	1489,2	1408,9	1424,8	2234,9	1750,1
1200	1432,7	1343,1	1500,5	1420,2	1436,1	2263,8	1776,9
1300	1443,2	1351,1	1510,6	1430,6	1446,5	2289,8	1802,8
1400	1452,8	1359,1	1520,2	1440,7	1456,6	2313,6	1828,0
1500	1462,0	1367,4	1529,4	1449,9	1465,8	2335,4	1852,7
1600	1470,8	1375,4	1537,8	1458,7	1474,6	2355,5	1876,1
1700	1478,8	1383,3	1546,2	1467,1	1482,5	2374,3	1899,6
1800	1486,7	1391,7	1554,1	1474,6	1490,1	2391,5	1921,3
1900	1493,9	1399,6	1561,7	1482,1	1497,2	2407,4	1942,3
2000	1501,0	1407,6	1569,2	1488,8	1503,9	2422,1	1962,8
2100	1507,2	1415,1	1575,9	1495,5	1510,2	2435,9	1982,4
2200	1513,5	1422,7	1583,0	1501,8	1516,0	2448,4	2000,9
2300	1519,4	1430,2	1589,7	1507,2	1521,5	2460,2	2018,9
2400	1525,3	1437,3	1596,4	1512,7	1526,9	2471,0	2036,5
2500	1530,3	1444,9	1602,7	1517,7	1532,0	2481,1	2052,8

Приложение Е

Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном объеме
 c'_v , Дж/м³·град

t , °C	Воздух	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	926,1	905,6	934,9	927,8	928,2	1228,8	1123,7
100	929,5	919,8	946,6	929,5	930,7	1329,3	1134,2
200	936,2	926,1	964,2	932,8	936,2	1416,4	1151,4
300	946,2	928,2	985,2	939,9	945,8	1491,8	1171,5
400	957,9	931,1	1006,5	949,6	957,9	1558,7	1194,5
500	971,8	934,1	1027,0	961,3	971,8	1617,8	1218,8
600	985,6	937,0	1045,9	974,3	986,4	1670,1	1243,9
700	999,8	941,2	1063,4	987,7	1001,1	1717,4	1270,3
800	1031,2	945,8	1078,9	1000,6	1015,3	1760,1	1297,1
900	1026,2	951,6	1093,6	1013,6	1028,7	1798,2	1324,7
1000	1038,7	957,9	1106,6	1017,8	1041,7	1832,6	1351,9
1100	1050,5	965,0	1118,3	1037,9	1053,8	1864,0	1379,1
1200	1061,8	972,2	1129,6	1049,2	1065,1	1892,9	1405,9
1300	1072,2	980,1	1139,6	1059,7	1075,6	1918,8	1431,9
1400	1081,9	988,1	1149,3	1069,7	1085,6	1942,7	1457,0
1500	1091,1	996,4	1158,5	1078,9	1094,8	1964,4	1481,7
1600	1099,9	1004,4	1166,9	1087,7	1103,6	1984,5	1505,2
1700	1107,8	1012,4	1175,2	1096,1	1111,6	2003,4	1528,6
1800	1115,8	1020,7	1183,2	1103,6	1119,1	2020,5	1550,4
1900	1122,9	1028,7	1190,7	1111,2	1126,2	2036,5	1571,3
2000	1129,6	1036,6	1197,8	1117,9	1132,9	2051,1	1591,8
2100	1136,3	1044,2	1205,0	1124,6	1139,2	2064,9	1611,5
2200	1142,6	1051,7	1212,1	1130,4	1145,1	2077,5	1629,9
2300	1148,4	1059,3	1218,8	1136,3	1150,5	2089,2	1647,9
2400	1154,3	1066,4	1225,5	1141,7	1156,0	2100,1	1665,5
2500	1159,3	1073,9	1231,8	1146,8	1161,0	2110,1	1681,8

Приложение Ж

Формулы для расчета средней теплоемкости газов
в пределах от 0 до 1500 °С

Газ	Массовая теплоемкость c , Дж/кг·град	Объемная теплоемкость, c' , Дж/м ³ ·град
Воздух	$c_v = 708,8 + 0,093 t$	$c'_v = 915,7 + 0,1201 t$
	$c_p = 995,6 + 0,093 t$	$c'_p = 1287 + 0,1201 t$
H ₂	$c_v = 10120 + 0,5945 t$	$c'_v = 909,4 + 0,0523 t$
	$c_p = 14330 + 0,5945 t$	$c'_p = 1280 + 0,0523 t$
N ₂	$c_v = 730,4 + 0,08955 t$	$c'_v = 913,1 + 0,1107 t$
	$c_p = 1032 + 0,08955 t$	$c'_p = 1306 + 0,1107 t$
O ₂	$c_v = 659,4 + 0,1065 t$	$c'_v = 943 + 0,1577 t$
	$c_p = 919 + 0,1065 t$	$c'_p = 1313 + 0,1577 t$
CO	$c_v = 733,1 + 0,09681 t$	$c'_v = 917,3 + 0,121 t$
	$c_p = 1035 + 0,09681 t$	$c'_p = 1291 + 0,121 t$
CO ₂	$c_v = 683,7 + 0,2406 t$	$c'_v = 1342,3 + 0,4723 t$
	$c_p = 872,5 + 0,2406 t$	$c'_p = 1713,2 + 0,4723 t$
H ₂ O	$c_v = 1372 + 0,3111 t$	$c'_v = 1102 + 0,2498 t$
	$c_p = 1833 + 0,3111 t$	$c'_p = 1473 + 0,2498 t$

Приложение И

Параметры насыщенного водяного пара (по давлению)

p , бар	t_n , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/кг·град	s'' , кДж/кг·град
0,01	6,94	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,02	17,49	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,03	24,08	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,04	29,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,24	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,08	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,10	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,14	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,18	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,2	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,3	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,4	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,5	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,6	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,8	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
1,0	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
1,2	104,80	0,0010472	1,430	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
1,6	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
2,0	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
3,0	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
4,0	143,62	0,0010836	0,4623	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
5,0	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
6,0	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
8,0	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
10	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
12	187,95	0,0011385	0,1633	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
14	195,04	0,0011488	0,1408	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16	201,36	0,0011587	0,1238	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
18	207,10	0,0011678	0,1104	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
20	212,36	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28	230,04	0,0012088	0,07742	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30	233,83	0,0012164	0,06663	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
35	242,54	0,0012344	0,05706	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1249
40	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,3	1570,5	3,0276	5,8894
70	285,80	0,0013510	0,02738	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
100	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
110	318,04	0,0014886	0,01597	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130	330,81	0,001568	0,01278	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731
160	347,32	0,001710	0,00932	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
180	356,96	0,001839	0,00751	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
200	365,71	0,00203	0,00586	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280

Приложение К

Параметры насыщенного водяного пара (по температуре)

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_n, \text{ бар}$	$v', \text{ м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{ м}^3/\text{кг}$	$i', \text{ кДж/кг}$	$i'', \text{ кДж/кг}$	$r, \text{ кДж/кг}$	$s', \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$	$s'', \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$
0	0,006108	0,0010002	206,3	0,00	2500,8	2500,8	0,00	9,1644
5	0,008718	0,0010001	147,2	21,06	2510,0	2489,0	0,0762	9,0242
10	0,012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,01704	0,0010010	77,97	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,03167	0,0010030	43,40	104,8	2546,4	2441,7	0,3672	8,5570
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,7	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
35	0,05622	0,0010060	25,25	146,6	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,5	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
45	0,09582	0,0010099	15,28	188,4	2582,4	2394,0	0,6385	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,05	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,15741	0,0010145	9,578	230,2	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,1992	0,0010171	7,678	251,1	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,3116	0,0010228	5,045	293,0	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,4736	0,0010290	3,409	334,9	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,7011	0,0010359	2,361	377,0	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	1,0132	0,0010435	1,673	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	1,4327	0,0010515	1,210	461,3	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
120	1,9854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	2,7011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
140	3,614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
150	4,760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	6,180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
170	7,920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
180	10,027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
190	12,553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075
200	15,550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	1940,6	2,3308	6,4318
210	19,080	0,0011726	0,1044	897,6	2797,0	1900,4	2,4246	6,3577
220	23,202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
230	27,979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	1812,7	2,6101	6,2132
240	33,480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	39,78	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
260	46,94	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
270	55,05	0,0013023	0,03560	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
280	64,19	0,0013321	0,03013	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
290	74,45	0,0013655	0,02553	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7824
300	85,92	0,0014036	0,02164	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
310	98,69	0,001447	0,01831	1402,2	2727,3	1325,1	3,3507	5,6233
320	112,80	0,001499	0,01545	1462,0	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	128,64	0,001562	0,01297	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	146,08	0,001639	0,01078	1594,8	2621,8	1027,0	3,6605	5,3361
350	165,37	0,001741	0,00881	1671,4	2564,4	893,0	3,7786	5,2147
360	186,74	0,001894	0,00694	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,0530
370	210,53	0,00222	0,00493	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951

Учебное издание

Техническая термодинамика

Методические указания к практическим занятиям
В двух частях
Часть 1

Составители:

Ольшанский Валерий Иосифович
Котов Алексей Анатольевич

Редактор *А.В. Пухальская*
Корректор *А.В. Пухальская*
Компьютерная верстка *А.А. Котов*

Подписано к печати 16.03.2023. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 3,4.
Уч.-изд. листов 4,4. Тираж 30 экз. Заказ № 89.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.