

2443

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Техническая термодинамика»

Ч. 2

Минск 2003

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Техническая термодинамика»
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4-х частях

Часть 2

РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Минск 2003

621.1
УДК ~~536.7(075.8)~~
Л12

Издание предназначено для студентов теплоэнергетических специальностей Белорусского национального технического университета, изучающих курс «Техническая термодинамика».

Практикум состоит из четырех частей. В первой части, изданной в 2002 году под названием «Идеальный газ», рассматриваются лабораторные работы, относящиеся к идеально газовому состоянию вещества. Материал предлагаемой второй части практикума объединяет сведения о реальных газах и жидкостях, прежде всего о воде, являющейся основным рабочим телом и широко распространенным теплоносителем. В последующих частях практикума будут рассмотрены вопросы, связанные с течением газов и паров, с состояниями и процессами влажного воздуха.

Составители:

В.Н.Романюк, Е.В.Томкунас, И.В.Баук, Л.В.Тарасевич

Рецензент Н.Б.Карницкий

Введение

Предлагаемое издание является составной частью лабораторного практикума, и потому такие разделы, как “Общие указания по выполнению лабораторных работ”, “Требования к отчету по лабораторным работам”, “Оценка ошибки и запись приближенных величин”, изложенные в первой части практикума и являющиеся единственными для дисциплины, здесь не рассматриваются. Вместе с тем очевидно, что лабораторные работы этой части практикума должны выполняться на основе материала, изложенного в указанных разделах. В остальном (нумерация работ, структура изложения материала) сохраняется преемственность: прежде приводятся основные теоретические сведения по тематике работ, углубленное усвоение которых, собственно, и является одной из целей выполнения лабораторных работ, затем следует непосредственное описание лабораторных работ. Рассматриваются методики, лежащие в основе лабораторных работ, установки, на которых проводятся экспериментальные наблюдения, предлагается порядок выполнения и оформления работ. В заключение приводятся вопросы для самоконтроля по каждой из работ.

Вещества, окружающие нас, находятся в различных состояниях: твердом, жидком, газообразном. Большинство технологических процессов проводятся в условиях, когда вещества, используемые в них в том или ином качестве, имеют жидкое или газообразное состояние. По этой причине и в теоретической части курса, и в лабораторном практикуме рассматриваются, прежде всего, эти состояния. Из них (по ряду причин) выделяется отдельно исключительно важная для инженерной деятельности область, получившая определение идеально газового состояния. Другая, в инженерной практике столь же значимая область состояний объединяет понятия перегретого, насыщенного и влажного пара, насыщенной жидкости и жидкости в ненасыщенном состоянии и обычно рассматривается под названием «Реальный газ». В этой области все вещества, окружающие нас, находятся в состоянии фазового равновесия или стремятся к нему. Теория и практика процессов, основанных на фазовом равновесии, достаточно сложны и объемны, постоянно развиваются и изменяются, а потому материал данной части практикума, посвященный реально-газовому состоянию, следует рассматривать как введение в соответствующие вопросы поведения реального газа.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Реальный газ

На практике приходится иметь дело с реальным газом. Степень расхождения свойств реального газа и его идеализированной модели – идеального газа – зависит от конкретных условий, в которых находится газ (от величин энтропии и объема или температуры и давления), и в данных условиях различна для разных газов (рис. 1).

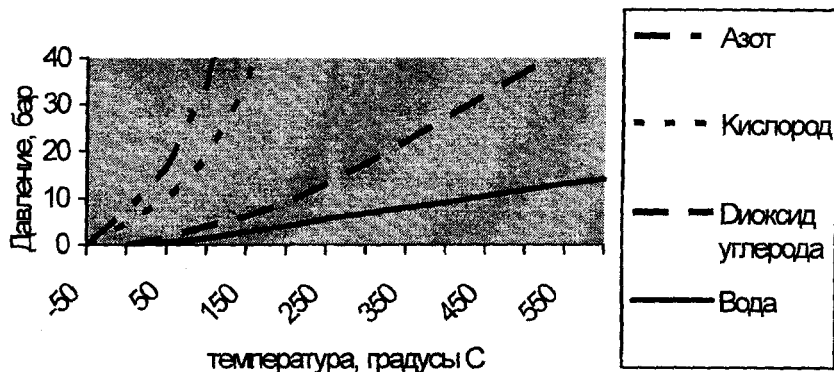


Рис. 1. Пределы применения идеально газовых соотношений (погрешность до 0,5%) для расчета калорических свойств веществ (указанная область лежит справа и ниже кривых)

Для характеристики отклонений термических свойств реального газа от свойств идеального обычно применяют коэффициент сжимаемости

$$z = p \cdot v / (R \cdot T), \quad (1)$$

где p , Па – давление;

v , м³/кг – удельный массовый объем;

R , кДж/(кг·К) – газовая постоянная;

T , К – температура газа.

Коэффициент сжимаемости — переменная величина, принимающая в зависимости от давления и температуры значения больше

либо меньше единицы, при малых давлениях $z \approx 1$. Для любого идеального газа его величина постоянна и равна единице. Зависимость коэффициента сжимаемости от давления при $t = 0^\circ\text{C}$ для некоторых газов показана на рис. 2. Очевидно количественное расхождение свойств реального и идеального газов.

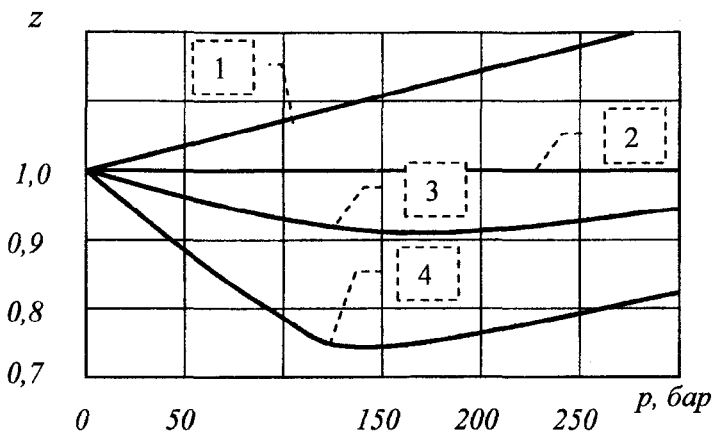


Рис. 2. Зависимость $z=f(p)$ при $t=0^\circ\text{C}$:
1 – водород, 2 – идеальный газ, 3 – кислород, 4 – метан

С помощью z -диаграммы удобно проследить за изменением отличий свойств идеального и реального газов. На рис. 3 представлена z -диаграмма для диоксида углерода (CO_2), вид которой характерен для всех реальных газов. Изотермы реального газа имеют сложный характер: их вид изменяется от монотонных кривых до кривых, имеющих точку экстремума–минимума. Точки минимума изотерм, удовлетворяющие условию $(\partial z / \partial p)_T = 0$, носят название точек Бойля. Линию, на которую ложатся эти минимумы, называют линией Бойля (на рис. 3 она показана штриховой линией). Характер этой линии таков, что давление в точке минимума изотерм с повышением температуры вначале увеличивается, а затем уменьшается. Температуру, при которой минимум изотерм совпадает с осью ординат ($p = 0$), называют температурой Бойля T_B (на рис. 3 видно, что значение T_B порядка 400°C). Количественная зависимость между температурой Бойля и наиболее известной и важной характери-

кой вещества, о которой речь пойдет ниже, критической температурой $T_{кр}$, для большинства веществ

$$T_B = (2 - 2,2) \cdot T_{кр}.$$

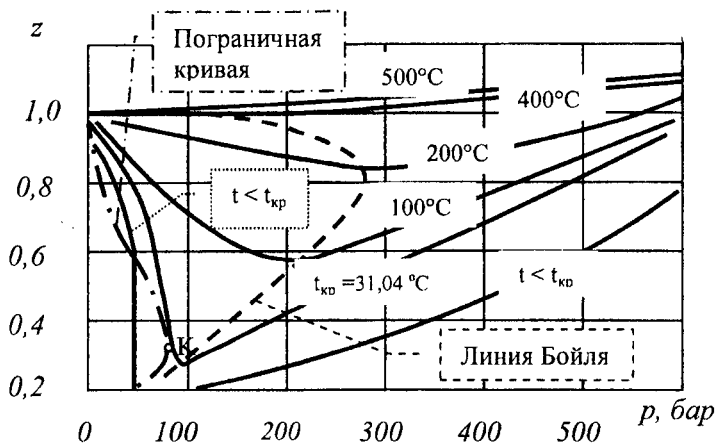


Рис. 3. Зависимость $z=f(p)$ для диоксида углерода

Изотермы в данной диаграмме имеют минимум только при температурах от $T_{кр}$ до T_B . То есть в этой области при постоянной температуре отклонения от идеального газа с ростом давления вначале увеличиваются, а затем уменьшаются.

Выше T_B коэффициент сжимаемости реальных газов всегда больше единицы и при постоянной температуре всегда возрастает при увеличении давления. Следовательно, выше T_B плотность реального газа всегда меньше плотности идеального газа, находящегося при тех же параметрах.

При температурах, меньших $T_{кр}$, в поведении изотерм реального газа отмечается качественное отличие от изотерм идеального газа, что выражается в наличии вертикального прямолинейного участка, на котором при постоянном давлении коэффициент сжимаемости продолжает изменяться. Этот участок соответствует переходу вещества из газового состояния в жидкое. Теория идеальных газов не

в состоянии объяснить превращение газа в жидкость, наступающее всякий раз, как только объем газа, сжимаемого, например, при постоянной температуре $T < T_{кр}$, достигает некоторого предельного значения, равного объему насыщенного пара.

Из анализа экспериментальных данных вытекает, что *свойства реальных газов не только в количественном, но и в качественном отношении существенно отличаются от свойств идеальных газов и все результаты, вытекающие из теории идеальных газов, нужно рассматривать как приближенные, справедливые для реальных газов лишь при очень малых плотностях последних.*

После появления на свет уравнения идеального газа было сделано много попыток составить уравнение состояния для реального газа. В настоящее время известно около двухсот таких уравнений. Наиболее широко распространено *уравнение Я. Ван-дер-Ваальса* (1873г.). Хотя для решения многих практических задач точность его недостаточна (уравнения состояния, весьма точно описывающие свойства различных реальных газов, в технических расчетах обычно не применяют ввиду их сложности), но оно качественно правильно описывает свойства вещества в жидком и газообразном состояниях одновременно. Именно поэтому его широко используют как основу для получения более точных уравнений состояния реального газа. Известны модификации Бертло, Дитеричи, Редлина-Кванга и многие другие [6].

Уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид

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

где a, b – константы, зависящие от природы газа.

Реальные газы от идеальных отличаются более сложным микростроением, при этом, соответственно, у них сложнее молекулярные и внутриаомные процессы. В уравнении (2) учтены силы межмолекулярного взаимодействия и собственный объем молекул:

поправка a/v^2 , называемая *внутренним (молекулярным) давлением*, характеризует силы взаимного притяжения молекул, которые действуют таким же образом, как и внешнее давление;

поправка b учитывает влияние собственного объема молекул, она соответствует тому минимальному объему, который может занять газ при очень сильном сжатии.

Индивидуальные постоянные a , b , R можно определить, если для данного вещества экспериментально измерены давление, температура и удельный объем хотя бы для трех состояний. Однако часто эти постоянные связываются с критическими параметрами вещества и в качестве определяющих в основном принимают критическое давление p_k и критическую температуру T_k (в зависимости от того, какая пара параметров взята в качестве определяющих, получаются различные значения постоянных a и b), т.к. обычно они известны с большей точностью, чем критический объем v_k :

$$a = 27 \cdot R^2 \cdot T_k^2 / (64p_k); \quad b = R \cdot T_k / (8p_k); \quad R = (8/3) \cdot (p_k v_k / T_k). \quad (3)$$

Теоретически обоснованным на данный момент является уравнение состояния, представляющее собой разложение коэффициента сжимаемости в бесконечный ряд по степеням плотности $1/v$:

$$z = pv / (RT) = 1 + B / v + C / v^2 + D / v^3 \dots, \quad (4)$$

где B , C , D ... – соответственно второй, третий, четвертый и т. д. вириальные коэффициенты, учитывающие взаимодействие соответственно двух, трех, четырех и т. д. молекул.

Уравнение (4) правильно передает физическую картину поведения газов, но применение его для количественных расчетов затруднительно ввиду сложности вычисления вириальных коэффициентов. По этой причине было создано *уравнение состояния в вириальной форме*, вириальные коэффициенты которого не связаны с энергией (потенциальной) взаимодействия молекул, а рассматриваются как эмпирические и определяются непосредственно по экспериментальным данным:

$$z = pv / (RT) = 1 + B' \cdot p + C' \cdot p^2 + D' \cdot p^3 \dots \quad (5)$$

Данное уравнение хорошо описывает исходные данные, обеспечивает согласованность термических и калорических значений и допускает некоторую экстраполяцию в область температур больших, чем достигнуты в эксперименте.

Отступление свойств реальных газов от свойств идеальных газов обнаруживается не только при изучении сжимаемости газов, но так-

же при изучении *калорических свойств* газов, например их теплоемкостей. Как говорилось ранее (см. часть 1 лабораторного практикума), теплоемкость идеального газа является функцией только температуры. В действительности теплоемкости газов (реальных) также зависят и от давления (или объема). Представление о виде этой зависимости для углекислого газа дает рисунок 4.

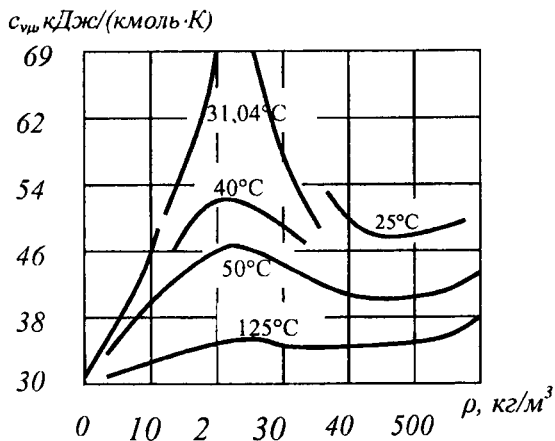


Рис. 4. Зависимость $c_{v, \text{м}} = f(\rho)$ для диоксида углерода

критическому объему; в критической точке теплоемкость, по-видимому, имеет, в соответствии с последними экспериментальными данными, бесконечно большое значение.

Несмотря на всю сложность поведения реального вещества, его свойства описываются дифференциальными соотношениями термодинамики (ДСТ). Для связи калорических и термических свойств наиболее важными являются два следующих ДСТ:

$$\left(\frac{c_p}{p} \right)_T = -T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T^2} \right)_p;$$

$$\left(\frac{c_v}{v} \right)_T = T \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T^2} \right)_v. \quad (6)$$

Эти ДСТ входят в набор *критериев проверки уравнения состояния вещества* на удовлетворение требованиям, предъявляемым к уравнениям состояния: если та или иная зависимость выполняет эти ДСТ, то она подвергается дальнейшей проверке, если же нет – она сразу исключается из списка уравнений состояния и является простой аппроксимирующей формулой.

Равновесие термодинамических систем

Из вышеизложенного следует, что любое реальное вещество, в зависимости от его температуры и давления, может находиться в различных агрегатных состояниях: в газовом (паровом), в жидком и твердом. Очевидно, что состояния реального газа более многогранны, чем состояния идеального газа. Отсюда наличие большого числа определений и понятий, необходимых для изучения реального газа, часть из которых приведена ниже. Во всех случаях при определении понятий строго используются терминология и формулировки из сборников терминов и обозначений, принятых в данной дисциплине.

Фаза — гомогенная часть гетерогенной термодинамической системы (ТС), ограниченная поверхностью раздела.

Гетерогенная термодинамическая система — ТС, состоящая из отдельных частей, разграниченных поверхностями раздела. При переходе через поверхность раздела хотя бы одно термодинамическое свойство вещества изменяется скачкообразно.

Гомогенная термодинамическая система — ТС, между любыми частями которой нет поверхности раздела.

Примером гетерогенной системы может служить вода с плавающим в ней льдом. В приведенной системе имеются две гомогенные области — вода и лед, представляющие собой различные фазы: жидкую и твердую. Химический состав этих фаз в данном случае одинаков, но физические свойства не просто отличаются друг от друга, а изменяются скачкообразно. Каждая из фаз является гомогенной системой, внутри которой изменение свойств имеет непрерывный характер. Для понимания сути гомогенной системы можно обратиться еще и к такому примеру. Гомогенной системой можно считать условно выделенный столб воздуха, представляющий собой смесь газов (азот, кислород, аргон и др.). Состав и физические свойства будут непрерывно меняться (без скачка) в результате действия силы тяжести от одной точки к другой. Гомогенная система, как это вытекает из примеров, может состоять из одного или нескольких индивидуальных веществ.

ТС (гомогенная, гетерогенная) может находиться в термодинамически неравновесном и равновесном состояниях. Среди последних различают состояния устойчивого и неустойчивого равновесия.

Равновесное состояние – состояние ТС, характеризующееся при постоянных внешних условиях неизменностью параметров во времени и отсутствием в системе потоков. Состояние ТС, не удовлетворяющее данному определению, называется неравновесным состоянием.

Устойчивое равновесное состояние (стабильное состояние) – состояние ТС, при котором всякое бесконечно малое воздействие вызывает только бесконечно малое изменение ее состояния, а при устранении этого воздействия система возвращается в исходное состояние.

Неустойчивое равновесное состояние (лабильное состояние) – состояние ТС, при котором бесконечно малые воздействия вызывают изменения состояния, которые не исчезают при устранении этих воздействий.

Метастабильное равновесное состояние (относительно устойчивое равновесное состояние) – состояние ТС, при котором бесконечно малые воздействия вызывают бесконечно малые изменения состояния, а некоторые малые конечные воздействия – конечные изменения состояния, которые не исчезают при устранении этих воздействий.

Время релаксации – время, в течение которого ТС, выведенная из состояния устойчивого равновесия под действием той или иной причины, возвращается в начальное состояние после устранения указанной причины. Релаксационные процессы являются неравновесными, а следовательно, и необратимыми процессами.

Условия устойчивого равновесия ТС изменяются в зависимости от ряда факторов: от самой ТС, от окружающей среды (ОС). В табл. 1 приведены условия устойчивого равновесия изолированной ТС для различных условий сопряжения ее с ОС. Стабильное состояние системы соответствует *абсолютному* максимуму или минимуму соответствующей характеристической функции: S , A , G .

Общие условия устойчивого равновесия изолированной ТС

Условия сопряжения системы с окружающей средой	Условие устойчивого равновесия термодинамической системы	Аналитическое выражение условия
Постоянство значений внутренней энергии и объема системы ($U = \text{const}$, $V = \text{const}$)	Экстремум-максимум энтропии системы	$dS = 0$, $d^2S < 0$.
Постоянство значений температуры и объема системы ($T = \text{const}$, $V = \text{const}$)	Экстремум-минимум энергии Гельмгольца (изохорно-изотермического потенциала) системы	$dA = 0$, $d^2A > 0$
Постоянство значений температуры и давления системы ($T = \text{const}$, $p = \text{const}$)	Экстремум-минимум энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) системы	$dG = 0$, $d^2G > 0$.

Общие условия равновесия могут быть представлены другими аналитическими выражениями, зависящими также и от вида ТС. Так, условия устойчивого равновесия однородной (во всех точках свойства одинаковы), однокомпонентной (состоящей из одного индивидуального вещества) и однофазной ТС, находящейся во взаимодействии с ОС, при котором и давление, и температура постоянны ($p = \text{const}$, $T = \text{const}$), имеют вид:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T < 0 \text{ – условие механической устойчивости;}$$

$$C_V > 0 \text{ – условие термической устойчивости.} \quad (7)$$

Напомним, что индивидуальное вещество состоит из частиц (молекул, ионов и т.д.) одинакового вида.

Из условия *механической устойчивости* (7) – следует, что увеличение объема при постоянной температуре всегда должно сопровождаться уменьшением давления. То есть состояние ТС будет абсолютно неустойчивым и малейшее уменьшение объема (например, при увеличении сил поля внешнего давления) приведет к уменьшению давления в системе. При этом возрастает причина изменения объема ТС (разность давлений), что еще больше уменьшает объем системы. Поскольку в такой ТС нет противодействия внешнему воздействию, в результате возникшего под действием любой причины сжатия ТС ее объем лавинообразно уменьшается до нуля – ТС исчезает.

Условие термической устойчивости (7) – требует, чтобы в состоянии устойчивого равновесия в процессе теплообмена температура ТС возрастала при подводе энергии и убывала при отводе энергии. В этом случае ТС противодействует воздействию, выводящему ее из состояния равновесия, что имеет место, если у ТС положительна ее теплоемкость в изохорном процессе изменения состояния (C_V). В другом случае подвод к ТС телом некоторого количества энергии при теплообмене, например вследствие флуктуации температуры в окружающей среде, вызывает уменьшение температуры тела по сравнению с начальным значением, что увеличивает причину протекания теплообмена – разность температур ОС и ТС. В результате тепловой поток к ТС возрастает, а температура продолжает понижаться, поскольку $C_V < 0$. Процесс, как и в предыдущем случае, развивается лавинообразно, и температура системы достигает нуля, т.е. не обеспечивается существование ТС.

Очевидно, что условия (7) устойчивого равновесия однородной системы выполняются не для всех значений независимых параметров, определяющих состояние ТС. В области, где условия (7) не выполняются, однородная система распадается на две сосуществующие однородные различные части – фазы. Такое равновесное сосуществование соприкасающихся между собой различных фаз одного вещества называется фазовым равновесием.

Фазовое равновесие – равновесное состояние ТС, состоящей из двух и большего числа фаз. При этом состояние систем «пар-жидкость» и «пар-кристалл» называется состоянием насыщения, а параметры – соответственно параметрами насыщения.

Температура фазового равновесия – температура, при которой существует фазовое равновесие вещества при заданном давлении.

Для того чтобы имело место сосуществование двух соприкасающихся фаз вещества, т.е. чтобы однокомпонентная двухфазная ТС находилась в состоянии устойчивого равновесия, необходимо:

1) выполнение, и это очевидно, условий устойчивого равновесия (7) каждой фазы в отдельности;

2) тепловое равновесие сосуществующих фаз, требующее равенства их температур $T_I = T_{II}$;

3) гидростатическое равновесие фаз, что при плоской границе раздела фаз обеспечивается равенством их давлений $p_I = p_{II}$;

4) диффузионное равновесие фаз, требующее равенства их химических потенциалов $\mu_I = \mu_{II}$ – условие химического равновесия.

Масса не входит в записанные выше условия равновесия фаз, т.е. от соотношения количества вещества в каждой из фаз равновесие не изменяется.

Химический потенциал – частная производная от характеристической функции по массе компонента при постоянных соответствующих независимых параметрах (при которых функция обладает свойствами характеристичности) и массах остальных компонентов

$$\begin{aligned} \mu_i &= \left(\frac{\partial G}{\partial m_i} \right)_{p, T, m_{j, j=1, 2, \dots, n, j \neq i}} = \left(\frac{\partial A}{\partial m_i} \right)_{V, T, m_{j, j=1, 2, \dots, n, j \neq i}} = \\ &= \left(\frac{\partial U}{\partial m_i} \right)_{V, S, m_{j, j=1, 2, \dots, n, j \neq i}} = \left(\frac{\partial I}{\partial m_i} \right)_{p, S, m_{j, j=1, 2, \dots, n, j \neq i}} \end{aligned} \quad (8)$$

где $G, A, U, I, Дж$, – соответственно энергия Гиббса, энергия Гельмгольца, внутренняя энергия, энтальпия ТС;

$m_i, кг$ – масса компонента;

$p, Па$ – давление;

$T, К$ – термодинамическая температура;

$V, м^3$ – объем ТС;

$S, Дж/К$ – энтропия ТС.

Химический потенциал совпадает с удельной энергией Гиббса вещества, в чем несложно убедиться. Для энергии Гиббса, как и для всякой аддитивной функции, справедливо соотношение

$$G = g \cdot m. \quad (9)$$

Поскольку и энергия Гиббса ТС $G = F(p, T)$, и удельная энергия Гиббса вещества, образующего систему $g = f(p, T)$, являются функциями давления и температуры, согласно (8) дифференцирование соотношения (9) по массе для однокомпонентной системы позволяет получить

$$\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial m} \right)_{p,T} = \left(\frac{\partial (g \cdot m)}{\partial m} \right)_{p,T} = g \cdot 1 + m \cdot 0 = g. \quad (10)$$

Напомним, что *характеристическая функция* – функция состояния ТС соответствующих независимых термодинамических параметров, характеризующаяся тем, что посредством самой функции и производных ее по этим параметрам могут быть выражены в явном виде все термодинамические свойства системы. Например, частные производные энергии Гиббса позволяют определить

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T = V; \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S.$$

Характеристическая функция содержит полную информацию о ТС, потому ее иногда называют фундаментальным уравнением состояния. Из характеристических функций чаще отдается предпочтение энергии Гиббса $G = f(p, T)$, поскольку в ней используются наиболее удобные для практики переменные T и p . Вместе с тем принятый Международный стандарт для воды [1] основан на харак-

термической функции Гельмгольца, которая сохраняет свойства характеристичности при использовании переменных V, T .

Из условия устойчивого химического равновесия двухфазной однокомпонентной ТС

$$\mu_I(p, T) = \mu_{II}(p, T) \quad (12)$$

следуют очень важные выводы:

очевидно, что соотношение (12) является уравнением некоторой кривой. Решая его относительно p , можно получить зависимость давления при фазовом равновесии однокомпонентной ТС от температуры и наоборот

$$P_{ф.н} = f(T_{ф.н}); \quad (13)$$

из (12, 13) следует, и это надо запомнить, что две фазы могут находиться в равновесии не при любых сочетаниях p и T , а при вполне определенных комбинациях их, причем задание одного из этих параметров однозначно определяет значение другого. Другими словами, ТС имеет одну термодинамическую степень свободы, т.е. лишь один параметр ТС может изменяться независимо и при его изменении все другие свойства ТС предопределены и в свою очередь изменяются, в соответствии со свойствами вещества. Напомним, что состояние индивидуального однофазного вещества поддается определению, если известны его два термодинамических параметра, т.е. имеет две термодинамические степени свободы.

Столь важное условие химического равновесия фаз целесообразно пояснить графически (рис. 5). На рис. 5, *a* для условий, когда температура системы постоянна, показано изменение химического потенциала каждой фазы. При малых давлениях более устойчива фаза II, поскольку ее химический потенциал меньше, чем у фазы I, и, согласно общим условиям равновесия (табл. 1), в этой фазе термодинамическая система более устойчива. При больших давлениях картина изменяется на диаметрально противоположную. Лишь в одной точке, определяемой выбранной температурой $T = \text{const}$, ТС обладает одинаково минимальным значением химического потенциала при любом сочетании обеих фаз. Эта точка соответствует фазовому равновесию и для данного вещества определяется только

температурой, при которой происходит анализ. Аналогичная ситуация прослеживается и для рис. 5, б, где давление ТС сохраняется постоянным, а изменяется ее температура. В этом случае давление ТС определяет все другие ее параметры в состоянии фазового равновесия однокомпонентной системы, состоящей из двух фаз.

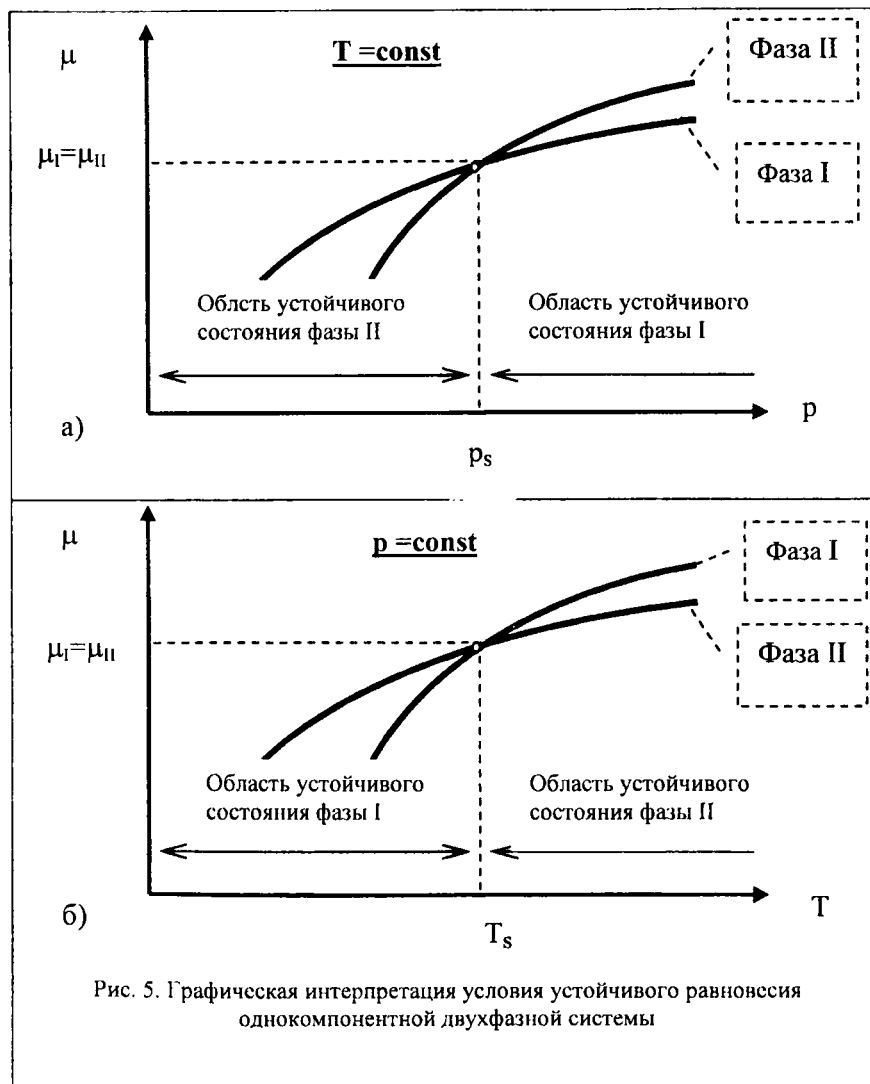


Рис. 5. Графическая интерпретация условия устойчивого равновесия однокомпонентной двухфазной системы

Фазовые переходы

Важнейшими термодинамическими процессами являются фазовые переходы. Фазовые переходы разделяют на переходы первого и второго рода, при этом под фазовым переходом понимают не только переход из одной фазы в другую, но и переход из одного агрегатного состояния в другое, что несколько шире.

Фазовый переход (или фазовое превращение) – термодинамический процесс перехода вещества из одной фазы в другую.

Фазовый переход первого рода – фазовый переход, при котором претерпевают скачки первые производные от химического потенциала. Используя соотношения (11), убеждаемся, что при фазовом переходе первого рода изменяются скачком объем и энтропия ТС. Далее, опираясь на известное выражение

$$dQ = TdS, \quad (14)$$

несложно сделать вывод о том, что изобарно-изотермический фазовый переход первого рода должен сопровождаться выделением или поглощением энергии в форме теплоты процесса $q_{ф.н.}$, Дж/кг.

К фазовым переходам первого рода относятся испарение и конденсация, плавление и кристаллизация, сублимация и десублимация, а также переходы из одной аллотропной кристаллической модификации в другую, например, «уголь—алмаз» для графита.

Теплота фазового перехода, $q_{ф.н.}$, Дж/кг – теплота, поглощаемая (выделяемая) в результате равновесного перехода вещества из одной фазы в другую. Частным видом теплоты фазового перехода является теплота парообразования (теплота конденсации, теплота испарения) r , Дж/кг.

Фазовый переход второго рода – фазовый переход, при котором первые производные от химического потенциала остаются постоянными, а вторые производные претерпевают скачки.

Для инженера-энергетика интерес представляет фазовый переход первого рода, потому на определении фазового перехода 2-го рода и ограничим его рассмотрение.

Основным уравнением, описывающим фазовый переход первого рода, является уравнение Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dp_{ф.н.}}{dT_{ф.н.}} = \frac{q_{ф.н.}}{T_{ф.н.} \cdot (v_{II} - v_I)}, \quad (15)$$

где $p_{ф.н.}$, Па, и $T_{ф.н.}$, К – давление и температура, при которых происходит фазовый переход;

$q_{ф.н.}$, Дж/кг – теплота фазового перехода;

v_I, v_{II} , м³/кг – соответственно удельные объемы вещества в фазе, из которой происходит переход, и в фазе, в которую происходит переход.

Уравнение (15) представляет собой также и уравнение кривой фазового равновесия для той или иной пары сосуществующих фаз в соответствующей системе координат.

Фазовая диаграмма – термодинамическая диаграмма, в которой по осям координат откладываются давление и температура и наносятся кривые фазового равновесия.

Кривая фазового равновесия – кривая на фазовой диаграмме, соответствующая состояниям равновесно сосуществующих фаз. Кривая фазового равновесия является характеристикой индивидуального вещества, позволяющей рассчитать ряд других его теплофизических свойств.

На рисунке 6 представлена фазовая диаграмма для диоксида углерода. Линии фазового равновесия твердой и жидкой, твердой и газообразной, жидкой и газообразной фаз разделяют однофазные области. Каждая точка кривой этой диаграммы соответствует состоянию равновесия двух фаз. В точках кривой Т-С равновесно существуют твердое тело и жидкость, и соответственно эту кривую называют *линией плавления* – фазового перехода из твердой фазы в жидкую. В точках кривой Т-К равновесно сосуществуют жидкость и пар (газ), и эта кривая носит название *кривой парообразования*.

Состояние насыщения – состояние системы «пар-жидкость» или «пар-кристалл» при фазовом равновесии.

Насыщенная жидкость – жидкость, находящаяся в равновесии с газовой фазой.

Насыщенный пар – пар, находящийся в равновесии с жидкой (твердой) фазой.

При обозначении аддитивных (экстенсивных) параметров насыщенной жидкости к установленным обозначениям того или иного параметра добавляется один штрих на месте верхнего индекса: V', U', I', S', A', G' . Соответственно применяется $V'', U'', I'', S'', A'', G''$ при обозна-

чении аддитивных параметров насыщенного пара. При обозначении давления и температуры равновесного фазового перехода «жидкость–пар» к установленным обозначениям добавляется латинское строчное “s” на месте нижнего индекса. Для всех остальных фазовых переходов к установленным обозначениям того или иного параметра добавляется нижний индекс с сокращенным названием фазового перехода и фазы.

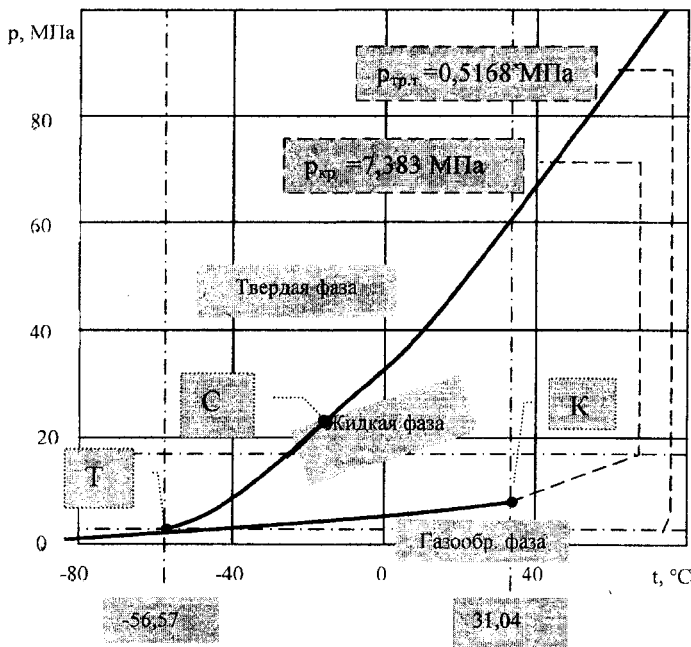


Рис. 6. Фазовая диаграмма для диоксида углерода — CO₂

Температура насыщения – температура системы «пар-жидкость» ($T_s, K, t_s, ^\circ C$) или «пар-кристалл» ($T_{сбл}, K, t_{сбл}, ^\circ C$) в состоянии фазового равновесия.

Давление насыщения – давление системы «пар-жидкость» (p_s) или «пар-кристалл» ($p_{сбл}$) в состоянии фазового равновесия.

Кривая парообразования – кривая на фазовой диаграмме, соответствующая равновесному сосуществованию жидкой и паровой фаз.

Парообразование – фазовый переход вещества из жидкого состояния в состояние пара.

Испарение – парообразование, происходящее только на свободной поверхности жидкости или твердого тела.

Кипение – парообразование, происходящее как на свободной поверхности жидкости, так и внутри ее.

Температура кипения – ($T_s, K, t_s, ^\circ C$) - температура равновесно-го фазового перехода жидкости в пар при постоянном давлении.

Конденсация – фазовый переход вещества из парового состояния в жидкое или кристаллическое.

Температура конденсации – температура равновесного фазового перехода вещества из газового состояния в жидкое ($T_s, K, t_s, ^\circ C$) или кристаллическое ($T_{сбл}, K, t_{сбл}, ^\circ C$) при постоянном давлении.

И температура кипения, и температура конденсации являются температурой насыщения.

Эжижение – фазовый переход вещества из парового состояния в жидкое.

Кривую ОТ (рис. 6), каждая точка которой соответствует равновесному сосуществованию твердого тела и газа, называют *кривой возгонки* или *сублимации* – фазового перехода из твердой фазы в газообразную. Все три линии переходов пересекаются в одной точке T , называемой *тройной точкой*.

Тройная точка – точка на фазовой диаграмме, соответствующая состоянию, в котором находятся в равновесии три фазы индивидуального вещества.

Основная тройная точка – тройная точка, соответствующая состоянию, в котором находятся в равновесии кристаллическая, жидкая и паровая фазы индивидуального вещества.

При давлении или температуре меньших, чем давление и температура вещества в тройной точке, это условие соответствует только твердой или газообразной фазе. Например, широкое применение CO_2 в качестве “сухого льда” основано на том, что при атмосферном давлении твердый CO_2 возгоняется при температуре $-78,5 ^\circ C$ и превращается сразу в газ, минуя жидкое состояние.

Состояние тройной точки различных веществ применяется при физико-химических экспериментах для весьма точного воспроизведения определенных температур. Например, основная тройная точка воды принята в качестве одной из реперных точек при построении Международной практической температурной шкалы.

Параметры вещества в состоянии тройной точки являются индивидуальными характеристиками вещества. В частности, термические параметры основной тройной точки для воды равны:

температура $t_{т.т} = 0,01 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,00008^\circ\text{C}$;

давление $p_{т.т} = 610,66 \text{ Па}$;

удельный объем льда $v_{м.ф.} = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$;

удельный объем жидкой фазы $v' = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$;

удельный объем паровой фазы $v'' = 206100 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Критическое состояние – состояние вещества, возникающее при исчезновении различия между фазами, находящимися в равновесии друг с другом (например, между жидкостью и ее паром, между двумя жидкостями и др.). Критическое состояние является индивидуальной характеристикой вещества, имеющей особое значение. Для воды параметры критического состояния сегодня составляют:

давление $p_{кр} = 2,2115 \cdot 10^7 \text{ Па}$;

температура $t_{кр} = 374,12^\circ\text{C}$;

удельный объем $v_{кр} = 0,003146 \text{ м}^3/\text{кг}$;

удельная энтальпия $i_{кр} = 2095,2 \text{ кДж/кг}$;

удельная энтропия $s_{кр} = 4,4237 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Для ряда других веществ они приведены в табл. 2.

Критическая точка – точка на термодинамической диаграмме, соответствующая критическому состоянию вещества.

Критическое состояние – предельное состояние двухфазной системы, когда теплота парообразования равна нулю и обе равновесно сосуществующие фазы становятся тождественными, т.е. исчезают различия между ними, но система обладает характерными свойствами двухфазной:

$$\begin{aligned}(\partial p_{кр} / \partial v_{кр})_{T_{кр}} = 0; (\partial^2 p_{кр} / \partial v_{кр}^2)_{T_{кр}} = 0; (\partial T_{кр} / \partial s_{кр})_{P_{кр}} = \\ = T/c_p = 0; (\partial^2 T_{кр} / \partial s_{кр}^2)_{P_{кр}} = 0.\end{aligned}$$

В критическом состоянии производная, выражающая условие механической устойчивости (7), обращается в нуль. В этом состоянии равна нулю и производная второго порядка:

$$(\partial^2 p / \partial v^2)_T = 0.$$

На устойчивое равновесие вещества в критическом состоянии указывает отрицательное значение производной третьего порядка $(\partial^3 p / \partial v^3)_T < 0$.

Параметры критического состояния некоторых веществ

№ п/п	Вещество	$P_{кр}$, МПа	$T_{кр}$, К	$v_{кр} \cdot 10^3$, м ³ /кг
1	Азот N ₂	3,394	126,2	3,21
2	Аммиак NH ₃	11,652	405,6	4,25
3	Ацетилен C ₂ H ₂	6,139	308,4	4,33
4	Ацетон C ₃ H ₆ O	4,70	508,2	3,60
5	Водород H ₂	1,297	33,2	32,20
6	Гелий He	0,229	5,2	14,43
7	Диоксид азота NO ₂	10,132	115,2	1,78
8	Диоксид углерода CO ₂	7,381	304,19	2,14
9	Закись азота N ₂ O	7,265	309,6	2,22
10	Кислород O ₂	5,036	154,3	2,06
11	Метан CH ₄	4,604	190,5	6,17
12	Метиловый спирт CH ₄ O	8,096	512,5	3,68
13	Окись углерода CO	3,546	134,1	3,21
14	Сернистый газ SO ₂	7,873	430,3	1,92
15	Хлор Cl ₂	7,711	417,1	1,74
16	Хлористый водород HCl	8,268	324,5	1,24
17	Четыреххлористый углерод CCl ₄	4,600	556,3	1,79
18	Этан C ₂ H ₆	4,880	305,4	4,93
19	Этиловый спирт C ₂ H ₆ O	6,383	516,2	3,62

Если система проходит через критическое состояние из однофазной области, то у нее сначала появляются свойства двухфазной, а затем исчезают свойства однофазной системы. И наоборот, при переходе через критическое состояние из двухфазной области у системы сначала появляются свойства однофазной, а затем исчезают свойства двухфазной системы. Отсюда свойства однофазной системы, определяющие ее устойчивость, которые не нарушаются в двухфазной области, сохраняются и в критическом состоянии:

$$(\partial T / \partial s)_T = T / c_v > 0; (\partial p / \partial v)_s < 0.$$

Критическое состояние не единственное, где отсутствует различие между жидкостью и газом (рис. 7, 8). На двухфазное состояние вещество может распадаться лишь при давлении и температуре ни-

же критических. Лишь в этой области параметров возможен переход из жидкой фазы в паровую и наоборот через насыщенное состояние с характерным скачком изменения свойств, получивший название фазового перехода. При сверхкритических параметрах переход из одной области в другую осуществляется без скачков, непрерывно и строгое различие жидкости и пара невозможно.

Величина $dp_{фл.} / dT_{фл.}$ показывает, как меняется давление, при котором происходит фазовый переход, при изменении температуры, т.е. является производной от давления по температуре, взятой по кривой равновесия фаз. Для большинства веществ с ростом давления температура плавления увеличивается, т.е. $(dP / dT)_{пл} > 0$, и кривая плавления составляет острый угол с осью температур (рис. 6). Однако для нескольких так называемых аномальных веществ, у которых твердая фаза в состоянии равновесия легче жидкой ($v_{ж.ф.} < v_{т.ф.}$) и плавает в расплаве (например, вода, чугун, германий, таллий и висмут), наблюдается понижение температуры плавления при увеличении давления, т.е. $(dP / dT)_{пл} < 0$, и кривая плавления расположена так, как показано на рис. 9, изображающем фрагмент из фазовой диаграммы воды.

Уравнение Клапейрона–Клаузиуса (15) для фазового перехода жидкость–пар записывается в виде

$$dp_s / dT_s = r / (T_s \cdot (v'' - v')). \quad (16)$$

При переходе вещества из жидкого состояния в пар теплота парообразования r положительна, а удельный объем вещества увеличивается, т.е. $\Delta v = v'' - v' > 0$. Здесь v' , v'' , m^3/kg – соответственно удельные объемы насыщенной жидкости и насыщенного пара.

Из вышеизложенного следует, что $dP_s / dT_s > 0$ и кривая парообразования, начинающаяся в тройной точке и заканчивающаяся в критической точке, всегда образует положительный наклон с осью температур. Другими словами, для всех веществ температура насыщения растет с ростом давления, при котором осуществляется фазовый переход, от минимального значения в тройной точке до максимального – в критической (рис. 6). Аналогичная зависимость будет и для перехода вещества из твердой фазы в газ, т.к. теплота сублимации положительна, а удельный объем газа всегда больше объема твердого вещества. Относительно наклона кривой равновесия для перехода вещества из твердой фазы в жидкую выше уже отмечалось, что если твердое тело плавает в своем расплаве, то с ростом давления температура плавления его будет понижаться, а если твердое тело тонет в своем расплаве, – повышаться.

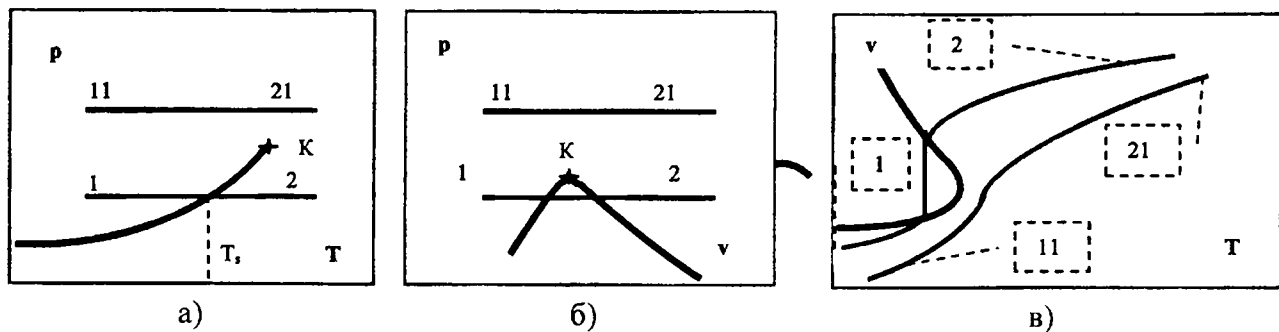


Рис. 7. Изобарный переход из одной области состояния в другую в докритической области (изобара 1-2 — фазовый переход) и в сверхкритической области (изобара 11-21): а — pT - диаграмма; б — pv - диаграмма; в — vT - диаграмма

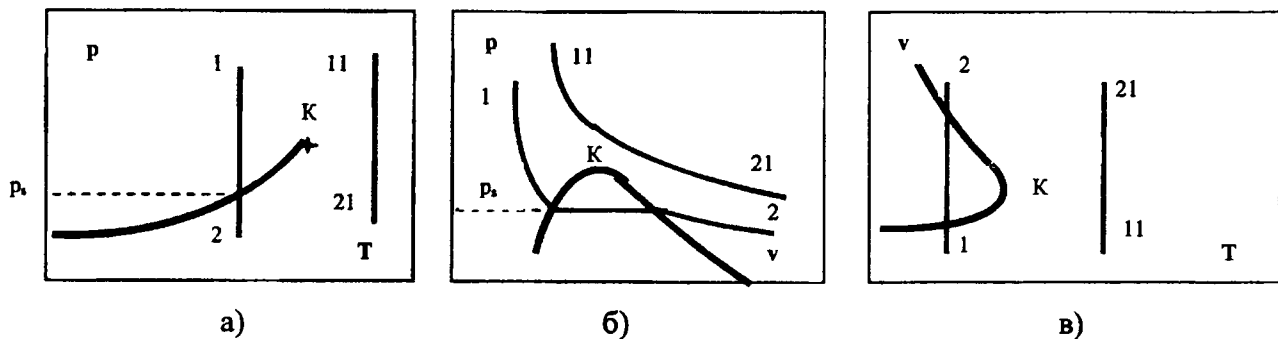


Рис. 8. Изотермический переход из одной области состояния в другую в докритической области (изобара 1-2 — фазовый переход) и в сверхкритической области (изобара 11-21): а — pT - диаграмма; б — pv - диаграмма; в — vT - диаграмма

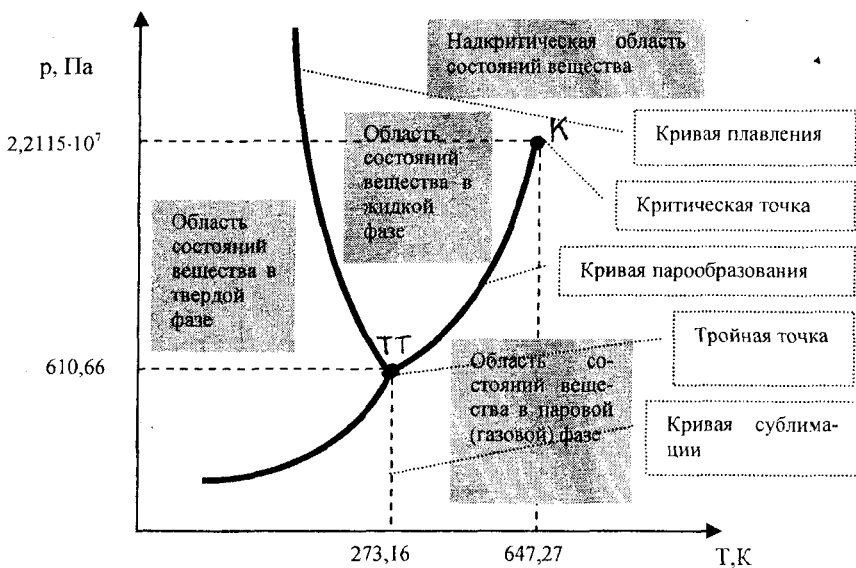


Рис. 9. Фазовая диаграмма для воды (фрагмент)

Особое значение для инженерной практики имеет фазовый переход «жидкость–пар». Теплота парообразования, связанная с протеканием фазового перехода “парообразование – конденсация”, уменьшается от максимального значения в тройной точке до нуля в критической точке (см. рис. 10, табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Некоторые значения температуры насыщения и теплоты парообразования для воды

p, кПа	22115	2 · 10 ⁴	1 · 10 ⁴	1 · 10 ³	1 · 10 ²	1 · 10 ¹	1	0,6107
t, °C	374,12	365,71	1315,8	179,88	99,63	45,83	6,982	0,01
r, кДж/кг	0	585,0	310,96	2014,4	2258,2	2392,6	2484,5	2501

Следует отметить аномально большое, в сравнении с другими веществами, значение теплоты парообразования воды. Например, у

хладонов [2], широко использующихся в холодильной технике, теплота парообразования существенно меньше. В табл. 4 приведены максимальные значения теплоты парообразования ряда веществ.

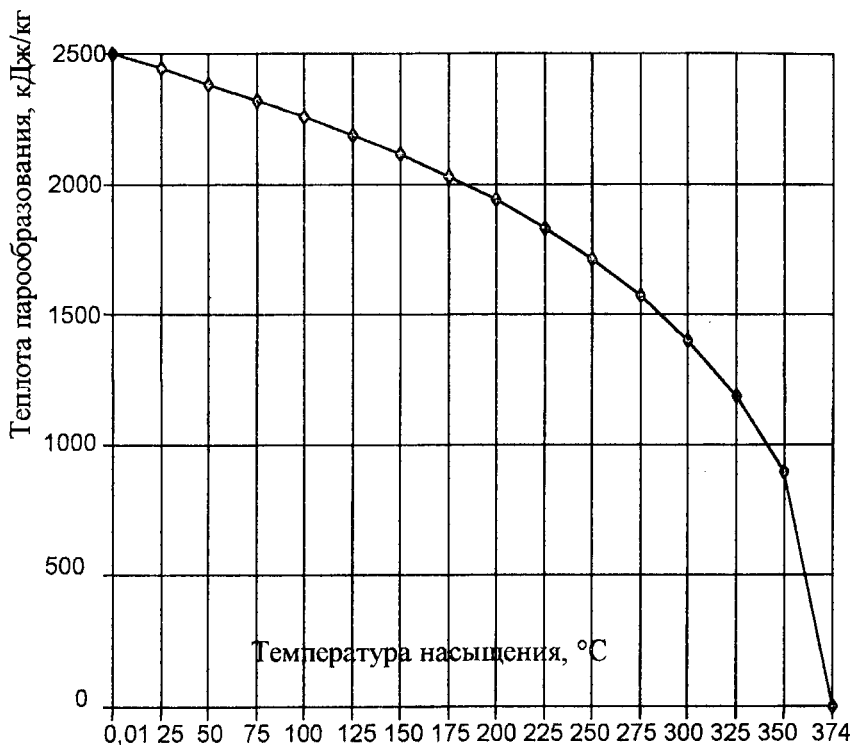


Рис. 10. Зависимость теплоты парообразования воды от температуры насыщения

Большое значение теплоты парообразования в сочетании с другими свойствами воды, такими как относительные доступность и инертность к конструктивным материалам, стоимость, экологическая безопасность, делают воду весьма желанным теплоносителем, что объясняет ее широкое распространение и в этом качестве.

Значения температуры насыщения, максимальной теплоты парообразования и некоторых свойств веществ холодильной техники [2]

Вещество и его химическая формула		$t_s, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	$P_{кр}, \text{кПа}$	
				При p_n				
Вода	H_2O	0,01	2501	99,63	0	374,12	22115	
Хладоны	R717	NH_3	-77	1478,1	-33,4	-77,7	132,4	11290
	R11	CFCl_3	-60	210,72	23,65	-111,0	198,00	4370
	R12	CF_2Cl_2	-75	183,98	-29,74	-155,0	112,00	4119
	R744	CO_2	-56,6	348,5	-	-78,5 _{сбп}	31,20	7383
Пропан (R290)	C_3H_8	-83,6	465,5	-41,97	-187,1	96,81	4269	

Экспериментальное исследование теплоты парообразования непосредственно прямым экспериментом связано с калориметрированием и, как следствие, требует увеличенных затрат ресурсов. Задача относительно упрощается, если использовать дифференциальные соотношения термодинамики (ДСТ), позволяющие проводить обработку других, более простых экспериментов с получением интересных тех или иных данных. ДСТ составляют основной и очень мощный математический аппарат термодинамики. Так, используя данные по зависимости между давлением и температурой насыщения на кривой парообразования, можно определить теплоту парообразования любого вещества.

Все свойства воды и водяного пара, относящиеся к состояниям на пограничной кривой «парообразование – конденсация», находятся по таблицам, диаграммам или аналитическим зависимостям, имеющим общее название «Вода и водяной пар в состоянии насыщения» [1, 3]. В указанных источниках при каноническом построении по давлению p_s (либо по температуре T_s) определяются все другие свойства воды: $T_s(p_s)$, v , u , i , s , v , u , i , s , r . Наличие одного аргумента отражает установленное ранее важное свойство любого однокомпонентного вещества: в состоянии равновесия двух фаз у чистого вещества имеется одна термодинамическая степень свободы. Выбор давления и температуры в качестве аргумента связан с удобством непосредственного измерения этих параметров. Таким

образом, давление определяет температуру и все прочие параметры индивидуального вещества на кривой фазового равновесия и, наоборот, температура определяет давление и все прочие параметры индивидуального вещества фазового перехода. Как уже отмечалось, принято говорить, что состояние имеет одну термодинамическую степень свободы. Вместе с тем, надо помнить, что в конкретном случае в роли аргумента может выступать любой параметр.

Термодинамические степени свободы – независимые термодинамические параметры, определяющие состояние каждой фазы равновесной системы.

Число термодинамических степеней свободы (c) определяется формулой, получившей название “*правило фаз Гиббса*”:

$$c = k - \phi + 2, \quad (17)$$

где k – число компонентов системы;

ϕ – число равновесно сосуществующих фаз.

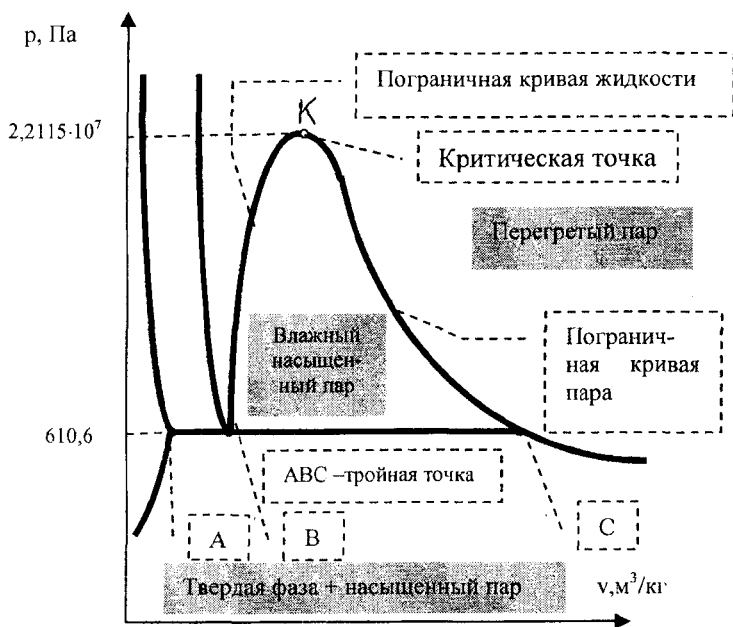


Рис. 11. p-v-диаграмма для воды (фрагмент)

Как уже отмечалось, в технических системах преобразования вещества и системах преобразования энергии наиболее часто встречается насыщенное состояние вещества вообще и воды в частности, поэтому оно имеет особое значение для практики. Это обуславливает необходимость дальнейшего рассмотрения состояния насыщения.

На рис.11 – 13 в различных термодинамических диаграммах показана область, в которых вещество находится в насыщенном состоянии. В этой области следует различать рассмотренные выше состояния насыщенной жидкости, насыщенного пара, которые ограничивают область, находятся на пограничной кривой, и состояния, получившие название «влажный пар». Находятся последние внутри области и вне пограничной кривой.

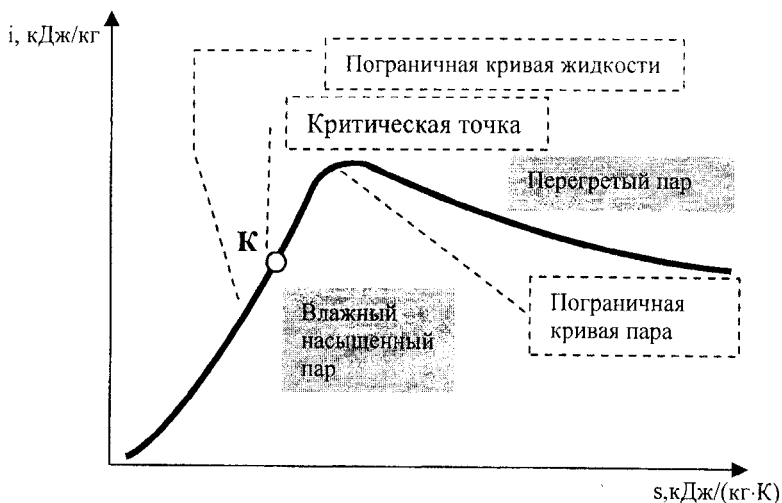


Рис. 12. is – диаграмма для воды (фрагмент)

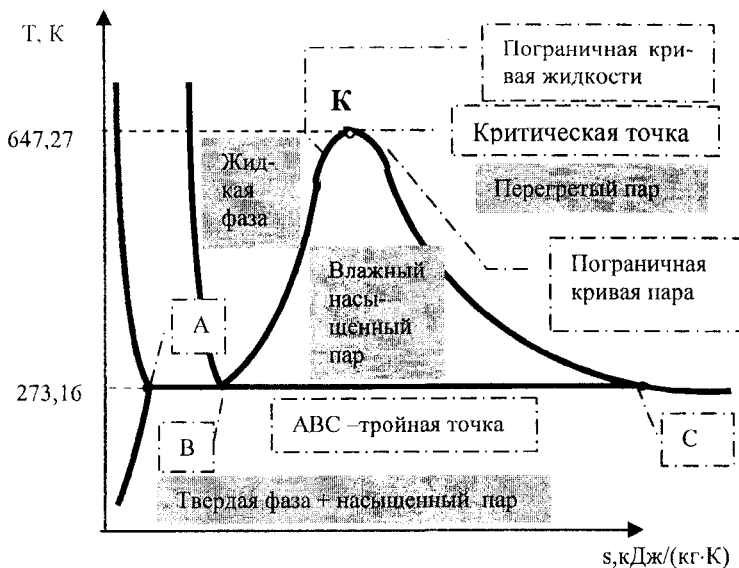


Рис. 13. Ts-диаграмма для воды (фрагмент)

Влажный пар — механическая смесь насыщенного пара и насыщенной жидкости. В пределе смесь может быть квазиоднородной, но чаще всего это крайне неоднородная система, в которой произвольным образом сочетаются два упомянутых состояния насыщенного вещества, образующих это новое состояние. Указанное обстоятельство о крайней неоднородности такой системы следует помнить всегда при работе с влажным насыщенным паром. Как для любой смеси, для влажного пара справедливо соотношение

$$M_x = M'' + M', \quad (18)$$

где M_x , кг — масса влажного пара;

M'' , кг — масса насыщенного пара, находящегося во влажном паре;

M' , кг — масса насыщенной жидкости, находящейся во влажном паре.

Массовую долю насыщенного пара принято называть степенью сухости влажного пара и обозначать буквой x :

$$x = M'' / M_x. \quad (19)$$

Массовую долю насыщенной жидкости принято называть степенью влажности влажного пара и обозначать буквой y :

$$y = M' / M_x. \quad (20)$$

Соотношение этих двух безразмерных характеристик друг с другом имеет вид

$$x + y = 1. \quad (21)$$

При постоянном давлении во всех состояниях влажного пара температура его постоянна и равна температуре насыщения при данном давлении для данного индивидуального вещества. Поэтому такая пара параметров, как давление и температура, для влажного пара не определяют его состояния. Для определения состояния влажного пара пригодна любая пара параметров кроме названного сочетания давления (p_s) и температуры (t_s).

Все аддитивные параметры влажного пара связаны с параметрами насыщенных жидкости и пара несложными и понятными соотношениями:

$$\begin{aligned} v_x &= v' \cdot y + v'' \cdot x = v' \cdot (1 - x) + v'' \cdot x = v' \cdot y + v'' \cdot (1 - y); \\ u_x &= u' \cdot y + u'' \cdot x = u' \cdot (1 - x) + u'' \cdot x = u' \cdot y + u'' \cdot (1 - y); \\ s_x &= s' \cdot y + s'' \cdot x = s' \cdot (1 - x) + s'' \cdot x = s' \cdot y + s'' \cdot (1 - y); \\ i_x &= i' \cdot y + i'' \cdot x = i' \cdot (1 - x) + i'' \cdot x = i' + r \cdot x = i' \cdot y + i'' \cdot (1 - y); \end{aligned} \quad (22)$$

где y – степень влажности пара;

x – степень сухости влажного пара.

Из соотношений (22) очевидно удобство использования степени сухости влажного пара в качестве одного из параметров пары, определяющей состояние влажного пара.

Между энтальпиями насыщенного пара и насыщенной жидкости, находящихся при одинаковом давлении, существует соотношение, вытекающее из определения теплоты изобарного процесса:

$$r = i'' - i', \quad (23)$$

где r , кДж/кг, – теплота парообразования вещества.

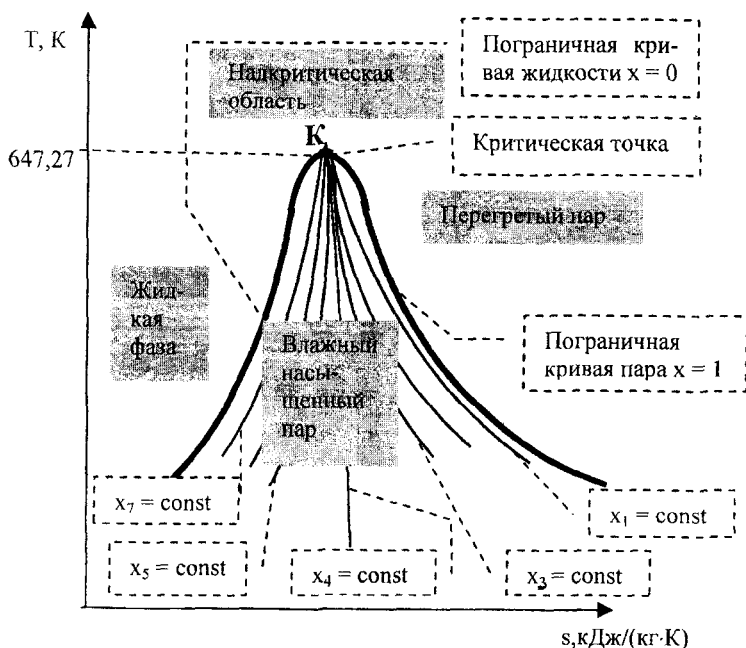


Рис. 14. Ts-диаграмма для воды (фрагмент)

На рис. 14 – 16 показана область состояний вещества, соответствующая влажному пару, и сопряженные с ней однофазные области в различных термодинамических диаграммах. Ограничивают область влажного пара, как уже отмечалось, два предельных состоя-

ния насыщения: состояние насыщенной жидкости, находящееся на пограничной кривой жидкости $x = 0$, и состояние насыщенного пара, находящееся на пограничной кривой пара $x = 1$. Участок изобары между состояниями насыщенной жидкости и насыщенного пара можно принять за условную единицу. Тогда отрезок упомянутого участка между состоянием насыщенной жидкости и состоянием влажного пара, характеризующегося степенью сухости x , пропорционален величине x оговоренной условной единицы, а оставшийся отрезок между состояниями насыщенного пара и тем же состоянием влажного пара пропорционален величине y .

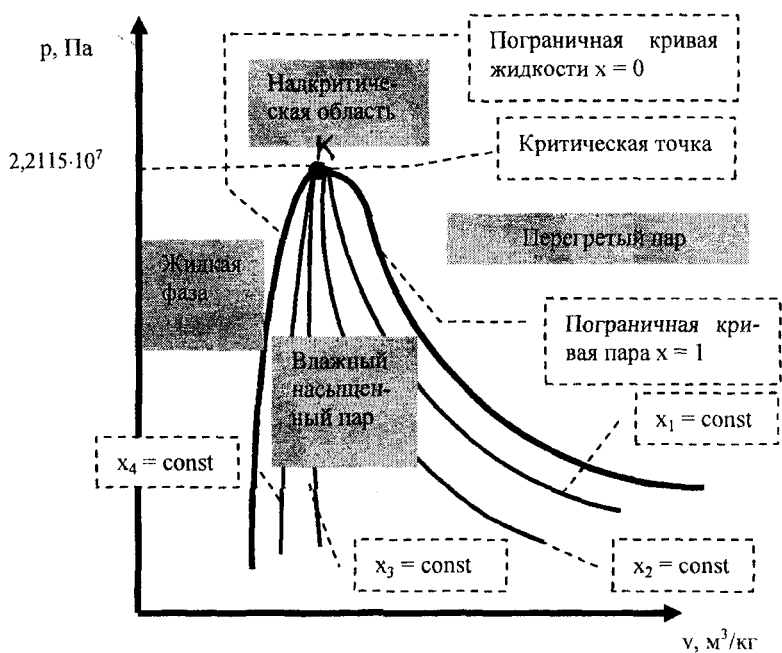


Рис. 15. $p-v$ - диаграмма для воды (фрагмент)

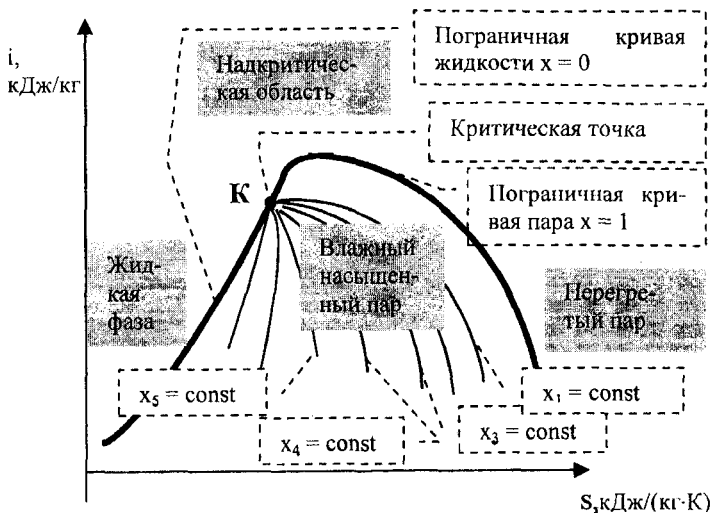


Рис. 16. i_s – диаграмма для воды (фрагмент)

Состояния влажного пара на различных изобарах, с одинаковыми значениями степени сухости x образуют на термодинамических диаграммах геометрическое место точек, составляющее изолинию $x = \text{const}$. Все изолинии $x = \text{const}$ сходятся в критической точке. На приведенных рисунках диаграмм можно видеть область однофазных состояний вещества, имеющих определение «перегретый пар».

Перегретый пар – пар, имеющий температуру более высокую, чем температура насыщенного пара при том же давлении.

Реальное вещество имеет достаточно сложную зависимость энтальпии от параметров состояния. В жидкой фазе энтальпия с ростом давления изменяется незначительно, и для воды в диапазоне давлений до 10 МПа в инженерных расчетах возможно применение простого соотношения

$$i = c_p \cdot t = 4,187 \cdot t, \quad (24)$$

где $t, ^\circ\text{C}$, – температура вещества.

Энтальпия перегретого пара зависит как от температуры, так и от давления (объема) вещества. На рис. 17, 18 даны i_p -диаграмма для воды и i_t -диаграмма водяного перегретого пара, из которых можно

получить представление о калорических свойствах вещества. Изотермы реального вещества на i - p -диаграмме далеки от изотерм идеального газа, которые имеют вид прямых, параллельных оси давлений (абсцисс). В жидкой фазе при невысоких температурах с ростом давления энтальпия монотонно растет. Затем, с ростом температуры, монотонность исчезает и на изотермах появляются экстремумы – минимумы. У воды минимумы на изотермах появляются при достижении температуры $t = 247,4$ °С. С дальнейшим увеличением температуры минимум сдвигается в сторону большего давления. Слева от экстремума, где $(\partial i/\partial p)_T < 0$, энтальпия уменьшается с ростом давления. Справа $(\partial i/\partial p)_T > 0$, что указывает на рост энтальпии с увеличением давления. В точках экстремума $(\partial i/\partial p)_T = 0$ происходит изменение знака, что дало им название точек инверсии. Расположение точек инверсии таково, что при параметрах воды в технических системах энтальпия воды на изотермах уменьшается с ростом давления.

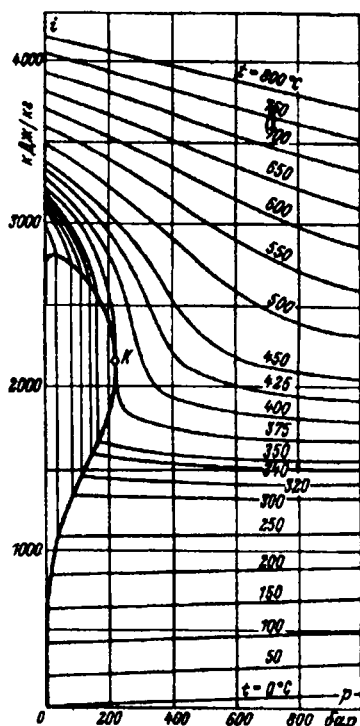


Рис. 17. i - p -диаграмма для воды

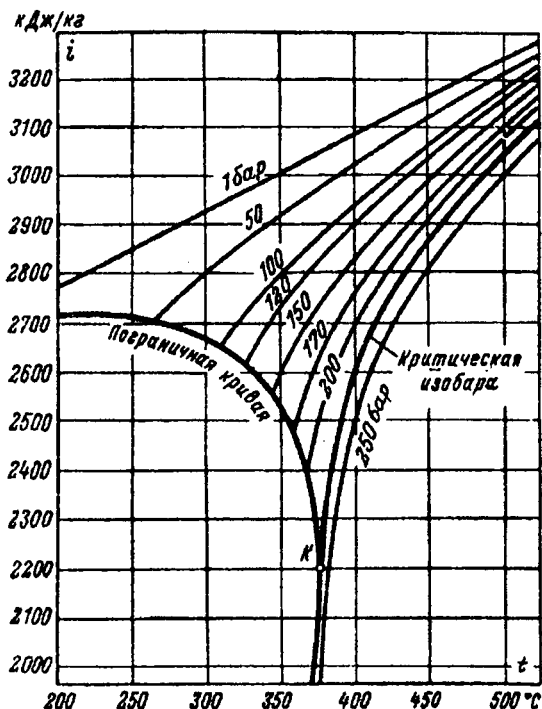


Рис. 18. i - t -диаграмма для водяного перегретого пара

Энтальпия индивидуального вещества является функцией двух параметров, что позволяет записать

$$di = (\partial i / \partial p)_T \cdot dp + (\partial i / \partial T)_p \cdot dT, \quad (25)$$

что преобразуется с помощью дифференциальных соотношений термодинамики к виду

$$i = i_0 + \int_{p_0}^p \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp + \int_{T_0}^T c_p dT, \quad (26)$$

где p_0 , T_0 – параметры вещества в реперной точке, где значение энтальпии данного вещества известно либо принимается требуемая его величина, например ноль.

В случае точки отсчета в области перегретого пара соответствующее значение i_0 можно рассчитать по соотношениям идеального

газа [5]. При докритических давлениях точки отсчета возможно также использование в качестве i_0 величины энтальпии жидкой фазы. На рис. 19 графически пояснены оба способа расчета энтальпии перегретого пара. Во втором варианте последняя формула трансформируется к виду

$$i = i_0 + \int_{T_0}^{T_s} c_p^{ж} dT + r + \int_{T_s}^T c_p^{нап} dT = \quad (27)$$

$$i_0 + \bar{c}_p \Big|_{t_0}^{t_s} (t_s - t_0) + r + \bar{c}_p \Big|_{t_s}^t (t - t_s) = i' + r + q_{неп},$$

где i_0 — значение энтальпии в реперной точке, обычно, для воды принимают при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ величину $i_0 = 0$ кДж/кг [1, 3].

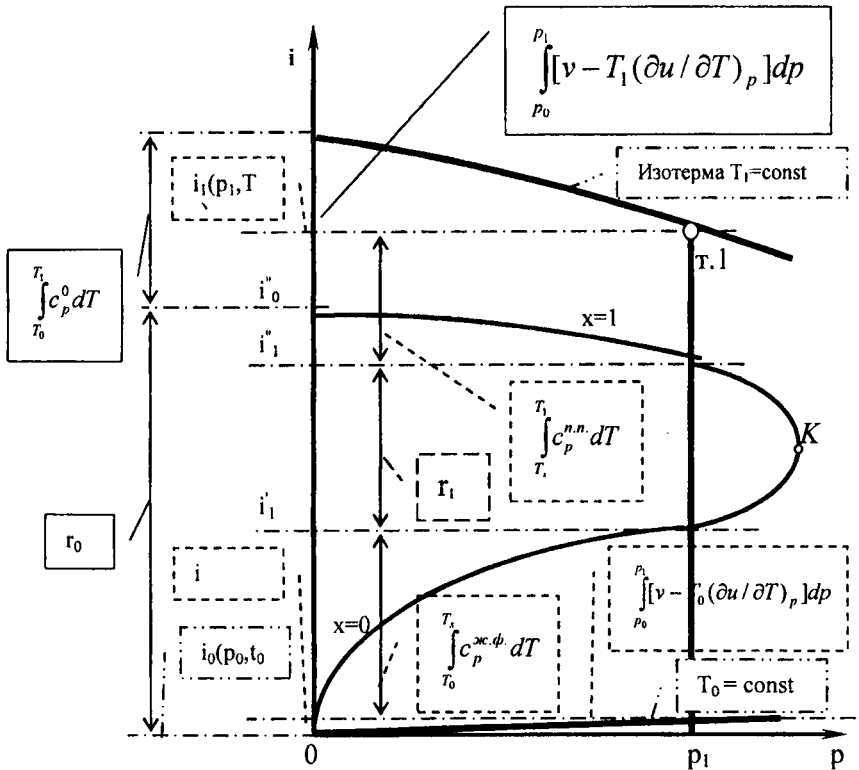


Рис. 1.19. Два способа расчета энтальпии перегретого пара

Важно разобраться в физической сути трех слагаемых энтальпии перегретого пара. На рис.1.19–1.21 показана геометрическая интерпретация составляющих энтальпии перегретого пара в термодинамических диаграммах.

Энтальпия перегретого пара в состоянии т.3 состоит из энтальпии насыщенной жидкости при том же давлении (t_1), плюс теплота парообразования r , плюс теплота перегрева пара $q_{п.п.}$. Сумма первых двух слагаемых образует энтальпию насыщенного пара (t_2). Постоянная интегрирования i_0 принята такой, что в точке изобары с температурой $t = 0^\circ\text{C}$ энтальпия равна 0.

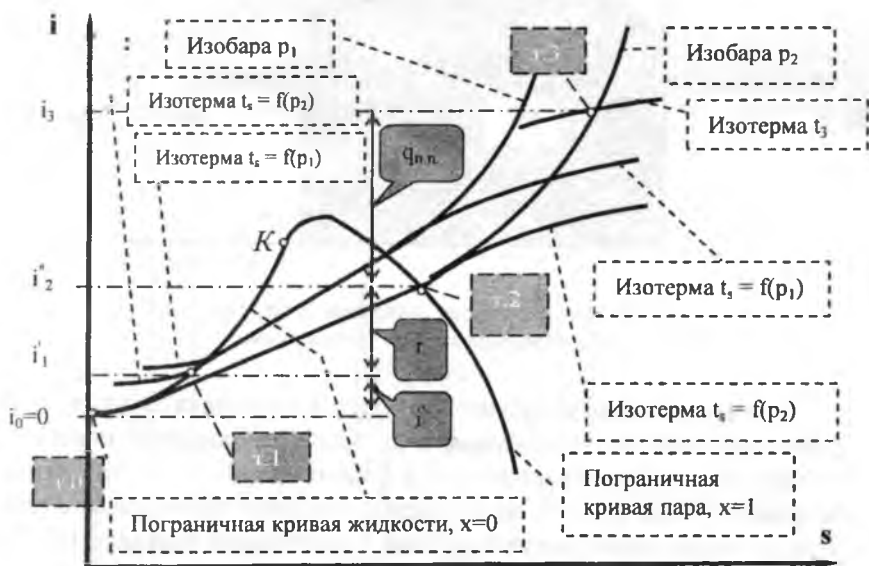


Рис. 20. Составляющие энтальпии перегретого пара и их изображение в i - s -диаграмме

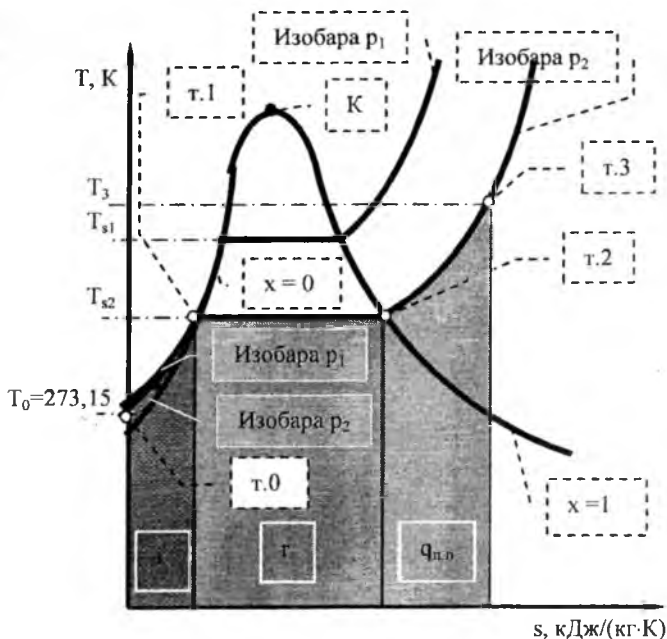
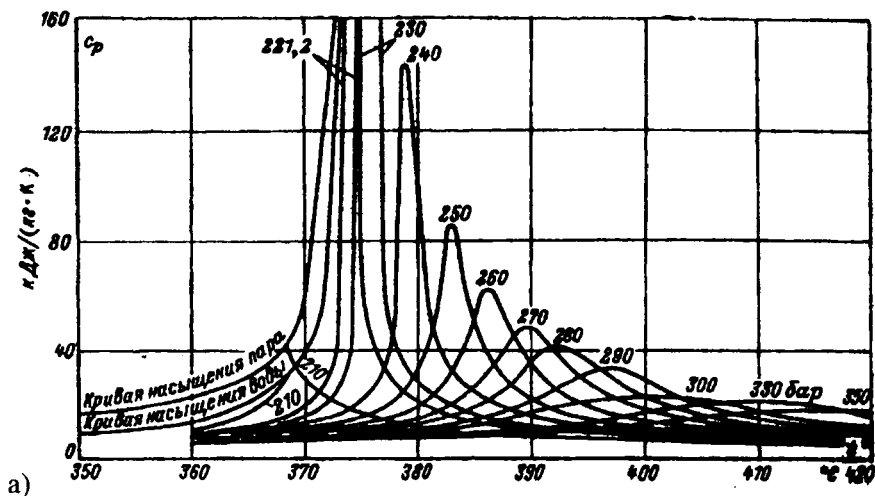


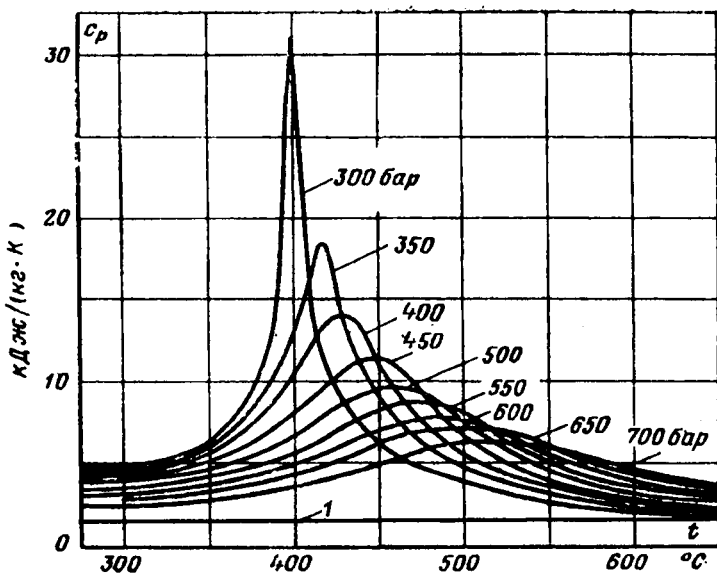
Рис. 21. Составляющие энтальпии перегретого пара и их изображение в Ts -диаграмме

Для использования температурного потенциала теплоты перегрева пара необходимо разделить процессы охлаждения перегретого пара до состояния насыщенного пара и процесс конденсации насыщенного пара. С этой целью перед конденсатором должен находиться специальный теплообменник, получивший название охладителя перегрева пара.

Конденсация пара осуществляется в теплообменнике, называемом конденсатором, при постоянной температуре, определяемой давлением. На выходе из конденсатора всегда имеет место состояние вещества, определяемое как «насыщенная жидкость». Для охлаждения полученной жидкости ниже температуры насыщения необходимо дополнительно использовать теплообменник, разделенный с конденсатором. Этот теплообменник получил название охладителя конденсата.



a)



b)

Рис. 22. Изобары теплоемкости c_p для водяного пара:
 а) околкритическая область;
 б) область при различных параметрах p и t

Теплоемкость перегретого пара в отличие от идеального газа зависит не только от температуры, но и от давления (либо объема), т.е. от двух независимых параметров. Зависимость эта достаточно сложна, в чем можно убедиться с помощью рис. 22, 23. И изобары, рис. 22, и изотермы, рис. 23, теплоемкости c_p имеют четко выраженный максимум. Величина этого максимума особенно выделяется вблизи околоскритической области, однако с ростом давления величина пиков уменьшается и смещается в сторону более высоких температур. При удалении от критической области отклонение свойств реального газа от свойств идеального газа, т.е. влияние давления на величину теплоемкости, ослабевает, кривые приближаются к асимптоте, в роли которой выступает теплоемкость идеально газового состояния данного индивидуального вещества. Для воды в идеально газовом состоянии значение изобарной, удельной массовой теплоемкости оказывается близким к $c_p \approx 2$ кДж/(кг·град) (рис. 22, б), в чем можно экспериментально убедиться в ходе выполнения соответствующей лабораторной работы практикума.

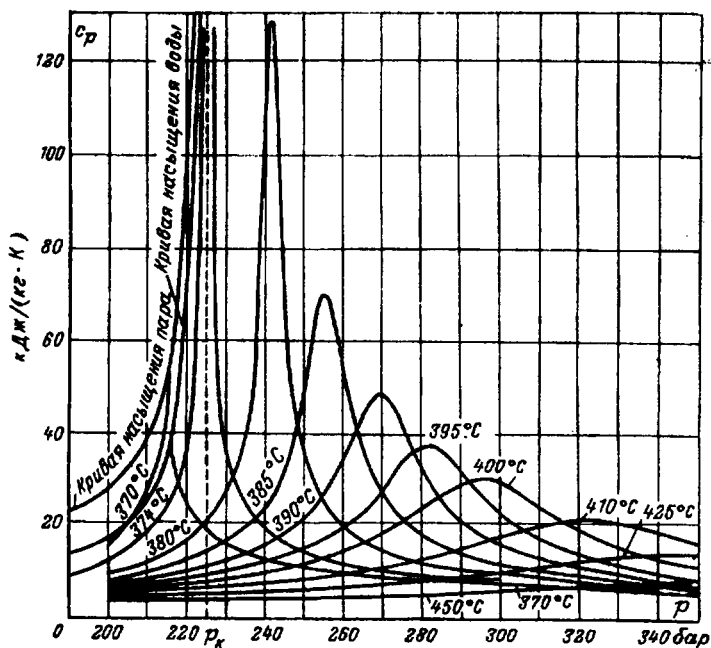


Рис 23. Изотермы теплоемкости c_p для водяного пара

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Цель работы

Изучение закономерностей изменения состояния реальных веществ при изотермическом сжатии в области температур выше и ниже критической температуры; аппроксимация экспериментальных данных; расчет других свойств диоксида углерода.

Описание установки

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.1. Диоксид углерода находится в толстостенном стеклянном капилляре, позволяющем достигать давления до 10 МПа. Давление внутри капилляра создается с помощью масляного пресса, который посредством ртутного затвора воздействует на диоксид углерода. Снижение давления в установке осуществляется открытием игольчатого вентиля, установленного на перепускном канале пресса. Ртутный затвор необходим потому, что с ростом давления масло достаточно сильно абсорбирует диоксид углерода и, тем самым, искажает реальную картину сжатия. Давление внутри капилляра определяется с некоторым приближением, равным давлению масла, и измеряется манометром. Изменение объема диоксида углерода определяется по границе раздела с ртутным столбиком, которая устанавливается путем отсчета по шкале измерительной линейки. Температура диоксида углерода принимается равной температуре термостатирующей воды, для чего необходимо поддерживать равновесное состояние между этими двумя системами. Температура термостатирующей воды определяется лабораторным термометром, а поддерживается на заданном уровне – с помощью термостата ТС-16.

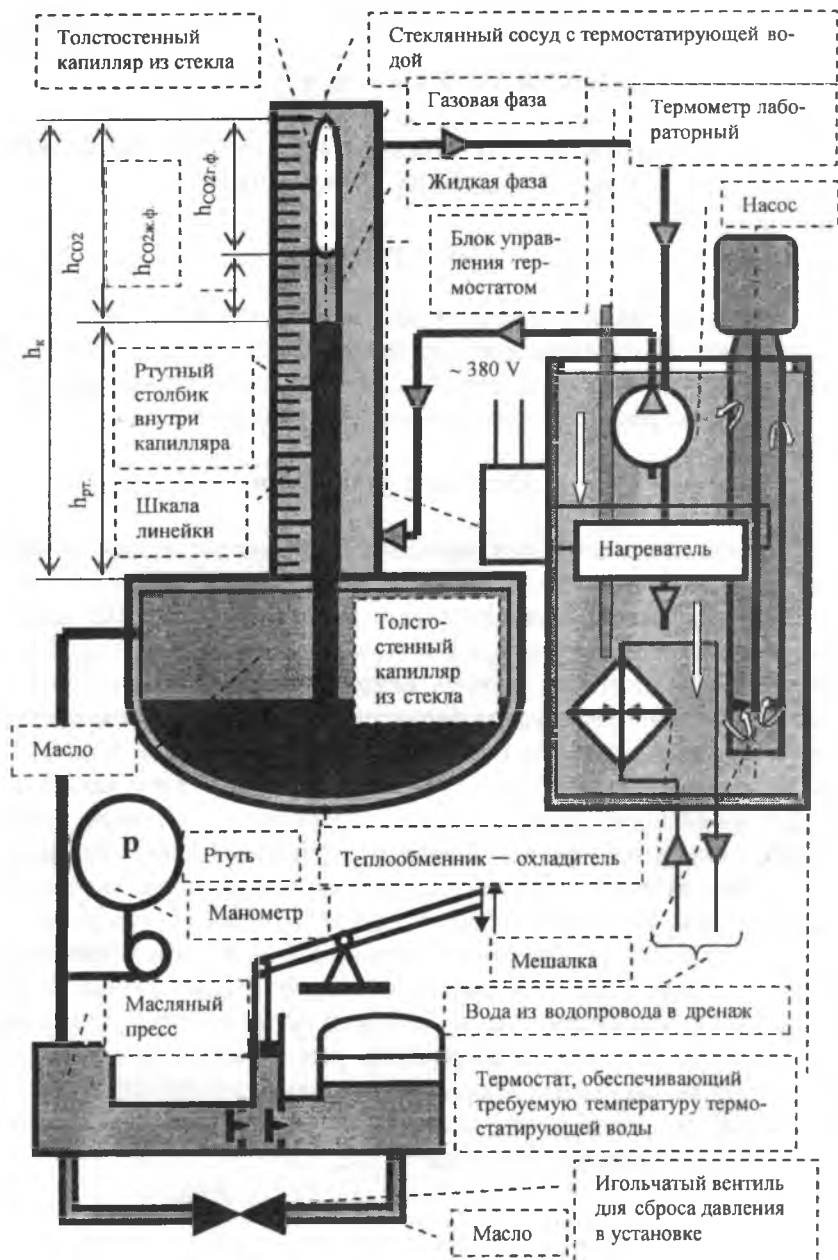


Рис. 1.1. Принципиальная схема лабораторной установки

Таким образом, описанная установка позволяет фиксировать в каждый момент времени давление, температуру и объем диоксида углерода, находящегося в капилляре. Для исключения разрушения капилляра при сжати жидкой фазы, когда по причине низкой сжимаемости жидкости давление растет на очень большую величину при малом изменении объема, в капилляре вместе с диоксидом углерода находится небольшое количество газов (воздуха), неконденсирующихся в данных условиях. Они играют роль демпфера при сжати жидкого диоксида углерода. Их влияние на изменение объема системы необходимо учитывать. Назначение других узлов установки ясно из схемы (рис. 1.1).

Порядок проведения работы

1. Изучите необходимый теоретический материал и заготовьте протокол наблюдений.
2. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Распределите функции между исполнителями.
3. Произведите замеры параметров окружающей среды (барометрического давления B и температуры помещения $t_{o.c.}$).
4. С разрешения преподавателя, в присутствии лаборанта включить установку и провести поэтапно следующие действия.

1 этап:

установить регулятор температуры термостата на значение из диапазона 15 – 22 °С, позволяющее без затруднений использовать таблицы свойств диоксида углерода (см. прил. 1);

добиться стационарного состояния системы;

закрывать игольчатый вентиль, с помощью масляного пресса плавно поднимать давление в системе до появления столбика ртути в диапазоне измерительной шкалы линейки; произвести отсчет давления, температуры, положения столбика ртути относительно линейки $h_{рт}$;

увеличить давление и повторить измерения предыдущего подпункта;

в момент появления жидкой фазы (при минимальном ее количестве) сделать очередные измерения. Появляется дополнительное измерение, связанное с замером высоты столбика жидкой фазы $h_{ж.ф}$;

продолжить подачу масла в систему, следить за перемещением столбика ртути, производить замеры. Обратить внимание на постоянство давления в системе. (Броски давления в системе в начальный момент сжатия вызваны кинетическими характеристиками системы, о чем речь пойдет ниже);

отметить момент окончания процесса конденсации по началу возрастания давления, сделать измерения параметров;

продолжить сжатие системы, состоящей из жидкой фазы диоксида углерода и неконденсирующихся газов (воздуха), и провести необходимые измерения. Опыты заканчиваются по достижении величины давления 70 – 80 ат.

2 этап:

плавно понизить давление (с помощью игольчатого вентиля);

повторить контрольные измерения, прежде всего на пограничных кривых пара и жидкости;

вернуть систему в начальное состояние.

3 этап:

изменить настройку регулятора температуры на значение, превышающее величину критической температуры диоксида углерода, но не выше 40 °С.

добиться стационарного состояния системы;

закрывать игольчатый вентиль, с помощью масляного пресса плавно поднимать давление в системе до появления столбика ртути в диапазоне измерительной шкалы линейки;

произвести отсчет давления, температуры, положения столбика ртути относительно линейки ($h_{рт}$);

увеличивая давление, повторять измерения до тех пор, пока не достигнете предельного давления;

возвратить систему в состояние, когда избыточное давление системы достигнет 0.

Выключить установку.

Протокол наблюдений

Данные измерений					Данные расчета			
№ п/п	t, °C	p, ати	Положение мениска на шкале, мм		p, ата	Длина столба жидкой и газовой фаз диоксида углерода; воздуха, мм		
			h _{ж.ф}	h _{г.ф}		h _{CO2ж.ф}	h _{CO2г.ф}	h _{возд}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
Параметры окружающей среды: температура $t_{o.c.} = \quad \text{°C}$, барометрическое давление $B = X \text{ мм рт. ст.} = X \cdot 133,3 \text{ Па}$. Длина капилляра $h_k = \quad \text{мм}$								

Обработка результатов измерений

1). Оценить качество замеров. Очевидно, что в опыте с докритической изотермой на участке жидкой фазы газовый столб можно считать воздухом. Поскольку имеет место изотерма, на этом участке давление и объемы соотносятся следующим образом:

$$p_2 / p_1 = v_1 / v_2. \quad (1.1)$$

Это соотношение выполняется достаточно точно и в случае выхода воздуха из идеально-газового состояния, поскольку коэффициент сжимаемости $z = pV / RT$ хоть и отличен от единицы, но в близких состояниях практически одинаков. Допуская неизменной площадь капилляра ($F_k = 0,8 \text{ мм}^2$) в различных сечениях, соотношение (1.1) можно переписать:

$$p_2 / p_1 = h_1 / h_2. \quad (1.2)$$

Теперь можно оценить качество замеров на основании выполнения соотношения (1.2) для соответствующего участка эксперимента.

2). Рассчитать массу воздуха в системе для оценки его влияния на измеренные показания. Для этого выбирается пара опытных данных, относящихся к наиболее достоверной группе. Далее из решения уравнения

$$p_1 \cdot (h_1 \cdot F_k) = M_a \cdot R \cdot T_1 \quad (4.3)$$

находится масса воздуха M_a .

3). Используя значения M_a и F_k , рассчитать длины столбов воздуха

$$h_j = M_a \cdot R \cdot T_j / (P_j \cdot F_k)$$

и парциальный объем воздуха

$$V_j = h_j \cdot F_k$$

на обеих изотермах в каждом состоянии, которое относится к паровому участку.

4). Рассчитать длины столбов газообразного диоксида углерода, характеризующие его эквивалентные парциальные объемы в том или ином состоянии:

$$h_{z.\phi CO_2} = h_{z.\phi} - h_a \quad (1.4)$$

5). Определить массу диоксида углерода, используя очевидное соотношение

$$F_k \cdot h = M \cdot v \quad (1.5)$$

Для осуществления этого из прил. 1 выбираем значения удельных объемов, например, значения удельных объемов в состояниях на пограничной кривой v' или v'' , а из табл. 1.1 выбираем соответствующие значения длин столбов жидкой или газообразной фаз CO_2 .

6). Определить по соотношению (1.5) удельные объемы диоксида углерода в каждом состоянии соответственно данным таблицы наблюдений. Результаты оформить в виде таблицы.

7). На основании полученных результатов построить графики обеих изотерм в pV -диаграмме.

8). Рассчитать коэффициенты уравнения состояния газообразного диоксида углерода вида

$$pV / RT = 1 + (A / T - B / T^2) \cdot p, \quad (4.6)$$

которые позволяют провести расчеты других свойств с помощью дифференциальных соотношений термодинамики. (Эти результаты будут использованы на практических занятиях и при выполнении расчетно-графической работы).

Вопросы для самопроверки

1. Что означает стационарное состояние системы?
2. Почему термостатирующая вода подается в стеклянную колбу в нижнем сечении, а отводится – в верхнем?
3. Назовите критические параметры для диоксида углерода.
4. Покажите, что соотношение давления и объема реального газа в изотермическом процессе для близких состояний соответствует закону Бойля – Мариотта.
5. Рассчитайте степень сухости влажного пара диоксида углерода на участке фазового перехода для экспериментальных точек.
6. Что такое парциальный объем газа, являющегося компонентом смеси?
7. Что такое коэффициент сжимаемости (неидеальности) вещества?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ ВОДЫ В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ НА КРИВОЙ ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Цель работы

Закрепление основных сведений по устойчивому равновесию гетерогенной однокомпонентной системы; изучение свойств воды по таблицам, фазовым диаграммам, аналитическим зависимостям, от-

носящимся к состоянию насыщения на кривой парообразования; экспериментальное исследование зависимости между температурой и давлением воды на кривой парообразования; обработка полученной экспериментальной зависимости и ее анализ.

Описание установки

Зависимость между температурой и давлением насыщения на кривой парообразования в узком диапазоне изменения давления ~ 100 кПа удобно определять с помощью установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1.

Прозрачный стеклянный цилиндр длиной $L \approx 540$ мм и наружным диаметром $D \approx 25$ мм, толщиной стенок $\approx 1,5$ мм заполнен водой. Высота столба жидкости h . Над поверхностью воды в цилиндре находится воздух. Давление внутри стеклянного баллона устанавливается на минимальном уровне с помощью вакуумного насоса, а измеряется вакуумметром, который может работать и как манометр. Температура описываемой системы измеряется лабораторным термометром. Длина баллона термометра ≈ 380 мм, диаметр ≈ 10 мм. С помощью нагревательного элемента и автотрансформатора к системе подводится энергия в требуемом количестве и выделяется в форме теплоты. Постоянство потока энергии контролируется по показаниям вольтметра, измеряющего падение напряжения на нагревательном элементе.

В стационарном состоянии в системе имеет место тепловой поток от нагревательного элемента к воде и далее через стенки стеклянного цилиндра к окружающему воздуху помещения. Тепловой поток, передаваемый от воды в помещение, при прочих постоянных условиях определяется температурой внутри системы, т.е. только температурой воды. Изменяя с помощью автотрансформатора поток энергии, таким образом, можно изменять температуру воды в баллоне.

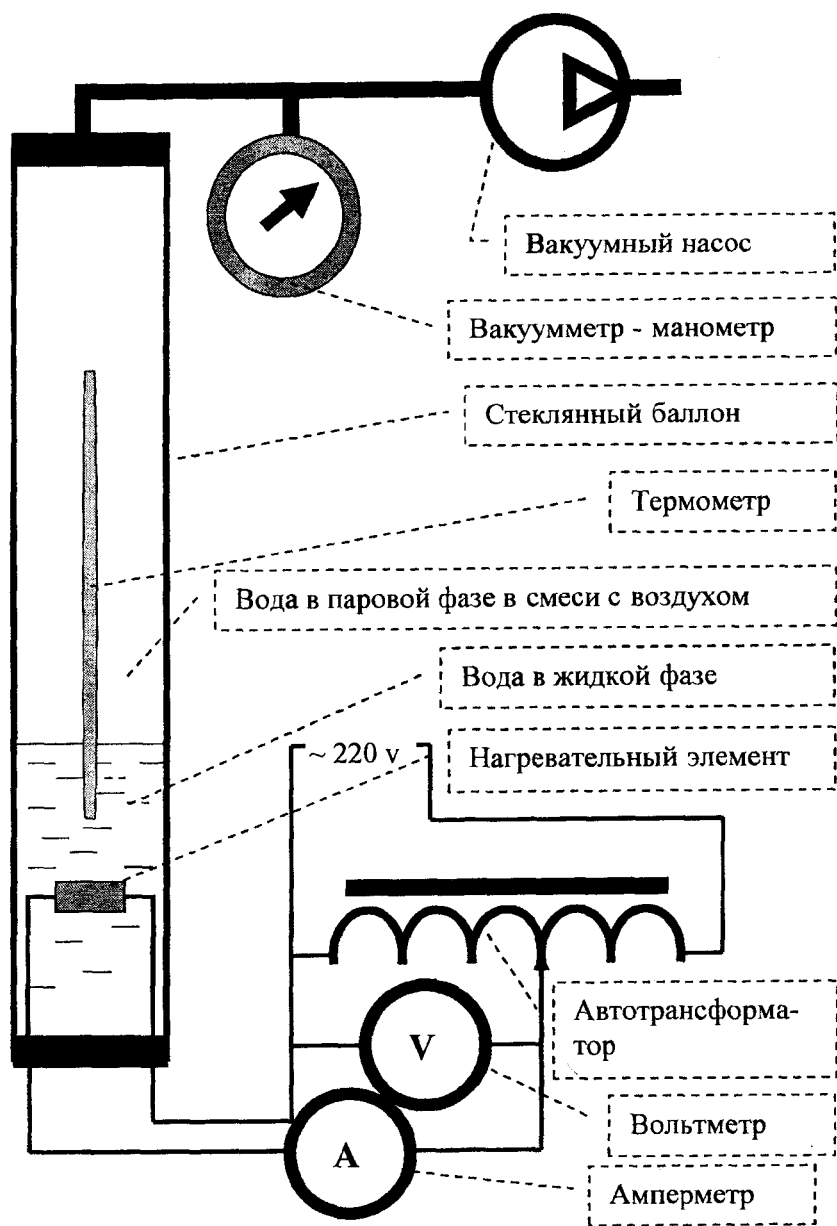


Рис. 2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки

При определенном минимальном значении подводимой энергии будет достигнута температура системы, соответствующая температуре насыщения при начальном минимальном давлении системы. Этот момент визуально отмечается кипением жидкости. При новом, большем значении потока энергии автоматически устанавливаются новые, более высокие значения температуры и давления фазового равновесия. Абсолютное давление в системе определяется с помощью барометра и вакуумметра (манометра).

Порядок проведения работы

1. Изучить теоретический материал и заготовить протокол наблюдений в форме табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Протокол наблюдений, табличные данные

№ п/п	Измеряемые значения				Данные из таблиц				
	ΔU , В	t , °С	$P_{\text{ман.}}$, кПа	$P_{\text{абс.}}$, кПа	$P_{\text{абс.}}$, кПа	γ , кДж/кг	v , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	Δp , кПа
Параметры окружающей среды: температура $t_{\text{о.с.}} =$ °С, барометрическое давление $V = X$ мм рт. ст. = $X \cdot 133,3$ Па. Длина и диаметр стеклянного цилиндра $L =$ мм; $D =$ мм. Высота столба жидкости $h_{\text{ж}} =$ мм. Высота столба воздушного объема цилиндра $h_{\text{возд.}} =$ мм.									

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой, распределить функции между исполнителями.

3. С разрешения преподавателя, в присутствии инженера включить установку и провести наблюдения в следующей последовательности:

а) установить начальное падение напряжения;

б) по достижении стационарного состояния зафиксировать показания термометра и манометра;

в) повторить действия с пункта «а», максимальное значение падения напряжения на нагревателе обязательно согласовать с инженером.

4. Отключить напряжение и зафиксировать прекращение процесса кипения.

5. С помощью инженера, используя вакуумный насос, уменьшить давление в системе.

6. Наблюдается возобновление процесса кипения без подвода электроэнергии, при этом необходимо зафиксировать показания манометра и термометра.

Обработка результатов измерений

1). Определить абсолютное давление в системе по известным соотношениям

$$p = B + p_{\text{ман}} \quad (2.1)$$

или

$$p = B - p_{\text{вак.}} \quad (2.2)$$

2). По данным измерения построить графическую зависимость $p_s = f(T_s)$ в диапазоне температур, наблюдавшихся в эксперименте.

3). Изучить таблицы «Вода и водяной пар в состоянии насыщения» из [3], которые широко используются в инженерных расчетах. По заданным экспериментально температурам определить табличные значения параметров системы для состояний, отмеченных в эксперименте, и занести их в табл. 2.1.

4). На графике (см. п. 2) построить табличную зависимость $p_s = f(T_s)$, используя значения п. 3.

5). Проанализировать причины расхождения экспериментальной и табличной зависимостей.

6). Получить аналитическую зависимость $p_s = f(T_s)$.

Нормативным документом для определения свойств воды и водяного пара, согласно решениям X Международной конференции Международной ассоциации по свойствам водяного пара (г. Москва, 1984 г.), является новое уравнение состояния для воды и водяного пара [1]. Необходимо разобраться с использованием аналитических зависимостей, приведенных для расчета свойств воды на кривой парообразования, и привести в отчете основные результаты.

В ряде случаев практической деятельности целесообразно использовать упрощенные аналитические зависимости для определения связи между давлением и температурой насыщения, справедливые для конкретного диапазона изменения параметров. Пример такой аналитической зависимости необходимо получить в данной работе на основании экспериментальных данных по нижеприведенной методике.

При отмечаемом в эксперименте изменении определяющего параметра, в качестве которого можно принять температуру или давление в системе, как это вытекает из вышеизложенного, теплоту парообразования можно принять постоянной $r = \text{const}$. При этом значение удельного объема насыщенного водяного пара столь велико, что его можно достаточно точно рассчитать по уравнению состояния идеального газа

$$v'' = R \cdot T_s / p_s, \quad (2.3)$$

где $R = 461,51$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная воды.

В сравнении с величиной v'' значение удельного объема жидкой фазы в состоянии насыщения v' ничтожно мало и в разности $(v'' - v')$ величиной v' можно пренебречь, заменив разность значением v'' . Сделанные допущения позволяют уравнение Клапейрона-Клаузиуса записать в виде

$$dp_s / dT_s = r \cdot p_s / (R \cdot T_s^2), \quad (2.4)$$

разделить переменные

$$dp_s / p_s = (r / (R \cdot T_s^2)) \cdot dT_s \quad (2.5)$$

и проинтегрировать

$$\ln(p_s) = -r / (R \cdot T_s) + \text{const}. \quad (2.6)$$

Очевидно, что последнее выражение имеет вид

$$\ln(p_s) = A - B / T_s. \quad (2.7)$$

Используя полученные экспериментальные данные в двух точках, коэффициенты А и В рассчитывают из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \ln p_{s1} = A - B/T_{s1}; \\ \ln p_{s2} = A - B/T_{s2}. \end{cases} \quad (2.8)$$

7). По полученной аналитической зависимости (2.7) построить кривую на графике, созданном ранее (п. 2).

8). Проанализировать ход всех трех кривых $p_s = f(T_s)$.

9). В координатах $(\ln p - 1/T)$ построить все три вышерассмотренные кривые.

10). Определить значение теплоты парообразования.

Из уравнения (2.4) получаем выражение для расчета теплоты парообразования

$$r = ((R \cdot T_s^2) / p_s) \cdot dp_s / dT_s. \quad (2.9)$$

Таким образом, величину теплоты парообразования в той или иной точке кривой фазового равновесия можно получить, используя экспериментальные данные (T_s, p_s) и величину dp_s / dT_s , которую можно определить графическим способом.

Для нахождения dp_s / dT_s в выбранной точке на полученной экспериментальной графической зависимости $p_s = f(T_s)$ проводится касательная рис. 2.2. С помощью отношения Δp_s к ΔT_s , определение величин которого показано на графике, находится графоаналитически искомая величина $\text{tg } \alpha = dp_s / dT_s$.

Расчет величины теплоты парообразования проводится в нескольких точках экспериментальной кривой парообразования.

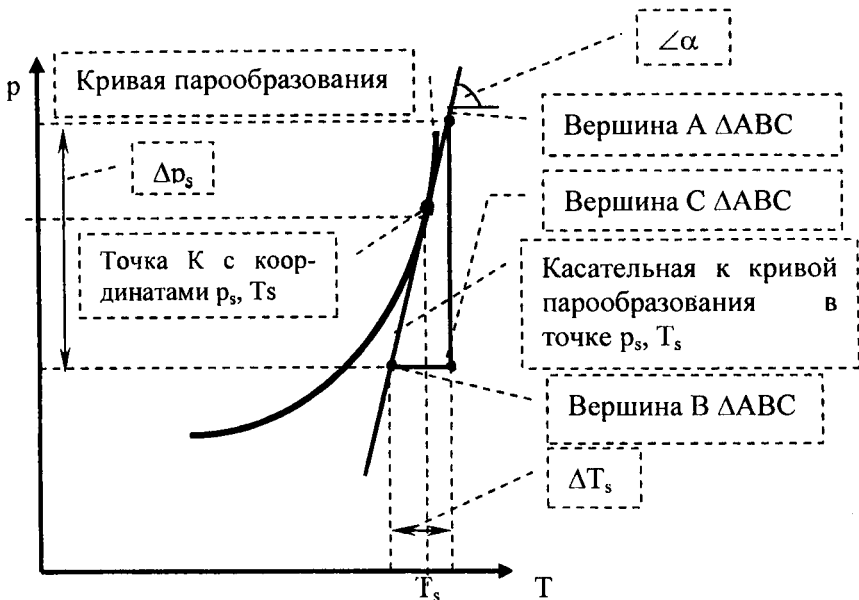


Рис.2.2. Определение значения dp_s/dT_s в точке К кривой парообразования

11). Полученные значения сравнить с табличными величинами для тех же значений температур насыщения. Проанализировать величину и причины расхождения табличных и расчетных данных.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные определения, встреченные в данной работе.
2. Как изменяются давление насыщения, теплота парообразования и другие характеристики системы при увеличении, уменьшении, постоянстве температуры насыщения?
3. Возможно ли наблюдать процесс кипения при давлении ниже давления тройной точки? При давлении выше давления критической точки?
4. Как показать, что наклон кривой парообразования для всех веществ положительный?
5. Как соотносятся параметры насыщенной жидкости v', u', i', s' и параметры насыщенного пара v'', u'', i'', s'' в критической точке?

6. Назовите численные значения критических параметров воды.
7. Назовите численные значения параметров тройной точки для воды.
8. С какой погрешностью реализуется температура тройной точки для воды?
9. Существуют ли другие тройные точки у воды? Что такое основная тройная точка?
10. Как называется теплота фазового перехода, протекающего при давлении ниже давления тройной точки? При давлении выше давления критической точки?
11. Как показать, что наклон кривой плавления для воды отрицательный?
12. Как соотносятся параметры насыщенной жидкости i' и параметры насыщенного пара i'' с теплотой парообразования в одном и том же состоянии на кривой фазового перехода?
13. Назовите численное значение теплоты парообразования воды в критической точке.
14. Назовите численные значения теплоты парообразования для воды в тройной точке и при атмосферном давлении.
15. Запишите уравнение Клапейрона – Клаузиуса и проанализируйте его.
16. Почему возможно заменить разность $(v''-v')$ для воды при давлении, близком к давлению тройной точки, при выявлении основных закономерностей поведения вещества?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ “ПАР - ЖИДКОСТЬ” ВОДЫ

Цель работы

Рассмотрение устойчивого равновесия гетерогенной однокомпонентной системы; экспериментальное исследование процесса сохранения равновесия двух фаз; обработка и анализ экспериментальных наблюдений.

Описание установки

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.1.

До тех пор пока не проведено подробное исследование данной системы, нельзя дать точные количественные характеристики ее поведения, но мы должны четко представлять качественный характер изменения свойств вещества. Так, при определенном минимальном значении подводимой энергии будет достигнута температура системы, соответствующая температуре насыщения при начальном минимальном давлении системы. Этот момент визуально отмечается кипением жидкости. При новом, большем значении потока энергии, приводящем к изменению температуры фазового равновесия, автоматически устанавливается новое, более высокое значение давления системы.

Оставляя неизменной величину потока энергии, выделяемой электронагревателем, можно нарушить в системе условия фазового равновесия следующим образом: откачивать вакуумным насосом газовую среду из парового объема стеклянного баллона. Система отреагирует процессами, приводящими к снижению температуры до температуры нового состояния фазового равновесия.

Наконец, возможен и такой сценарий. К системе прекращается всякий подвод энергии, естественно, прекращается и процесс кипения, требующий, как всякий фазовый переход первого рода, подвода энергии, равной соответствующей теплоте фазового перехода, в данном случае теплоте парообразования. При понижении давления в системе с помощью вакуумного насоса можно наблюдать возобновление процесса кипения, причем происходит это в форме взрыва. Источником энергии, необходимой для обеспечения фазового перехода, служит жидкая фаза воды, поведение которой обеспечивает переход системы в новое устойчивое состояние равновесия.

Порядок проведения работы

1. Изучить теоретический материал и заготовить протокол наблюдений в форме табл. 3.1.

Протокол наблюдений

№ п/п	ΔU , В	I, А	t , °С	$p_{\text{вак}}$, ат	$p_{\text{абс}}$, кПа	$h_{\text{ж.ф.}}$, мм	$h_{\text{п.ф.}}$, мм	$h_{\text{в.}}$, мм	Момент измерения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<u>$U_1=0$</u>	0							$\tau = \tau_{\text{стац}}$
2	<u>U_2</u>								$\tau = \tau_{\text{стац}}$
3	<u>$U_3 > U_2$</u>								$\tau = \tau_{\text{стац}}$
4	<u>$U_4 = U_3$</u>			<u>$p_4 \leq p_3$</u>					$\tau = 0$
									$\tau = \tau_{\text{стац}}$
5	<u>$U_5 = 0$</u>								$\tau = 0$
									$\tau = \tau_{\text{уст}}$
6	<u>$U_6 = 0$</u>			<u>$p_6 \leq p_5$</u>					$\tau = 0$
									$\tau = \tau_{\text{уст}}$
7	<u>$U_7 = 0$</u>			<u>$p_7 \leq p_6$</u>					$\tau = 0$
									$\tau = \tau_{\text{уст}}$

Параметры окружающей среды:
 температура $t_{\text{о.с.}} = \quad \text{°С}$,
 барометрическое давление $B = X \text{ мм рт. ст.} = X \cdot 133,3 \text{ Па}$.
 Длина и диаметр стеклянного цилиндра $L = \quad \text{мм}$; $D = \quad \text{мм}$.
 Высота столба жидкости $h_{\text{ж}} = \quad \text{мм}$.
 Высота столба воздушного объема цилиндра $h_{\text{возд}} = \quad \text{мм}$.

Ячейки таблицы, в которых подчеркнут текст, означают, что данные параметры изменяются наблюдателями активно в ходе эксперимента. Другие ячейки заполняются в результате наблюдения последующих изменений. Последний столбец таблицы указывает момент времени измерения параметров: $\tau = 0$ – означает, что измерения производятся в начальный момент изменения параметра; $\tau = \tau_{\text{стац}}$ – означает, что измерения производятся в период стационарный или квазистационарный.

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой, распределить функции между исполнителями работы.

3. С разрешения преподавателя, в присутствии инженера провести наблюдения в следующей последовательности:

а) произвести замеры давления, температуры, высоты объемов цилиндра, соответствующих жидкой и паровой фазам, в момент, когда установка еще не включена;

б) установить начальное падение напряжения и по достижении стационарного состояния произвести те же замеры. Результаты занести в протокол;

в) увеличить напряжение и по достижении стационарного состояния системы зафиксировать параметры системы;

г) оставляя неизменной величину потока энергии, изменить давление системы, откачивая вакуумным насосом газовую среду. Произвести замеры в момент изменения параметра и во время стационарного периода;

д) отключить напряжение и произвести замеры в начальный момент времени и в момент установившегося режима;

е) без подвода энергии изменить давление системы. Произвести визуальное наблюдение за системой с регистрацией соответствующих параметров.

Обработка результатов измерений

1). Определить абсолютное давление в системе

$$p = B + p_{\text{ман}}. \quad (3.1)$$

2). По наблюдавшимся в опытах температурам определить значения $p_s, v', v'', i', i'', r, s', s''$ для состояний 2 – 7 табл. 3.1 из таблицы “Вода и водяной пар в состоянии насыщения” (прил. 2).

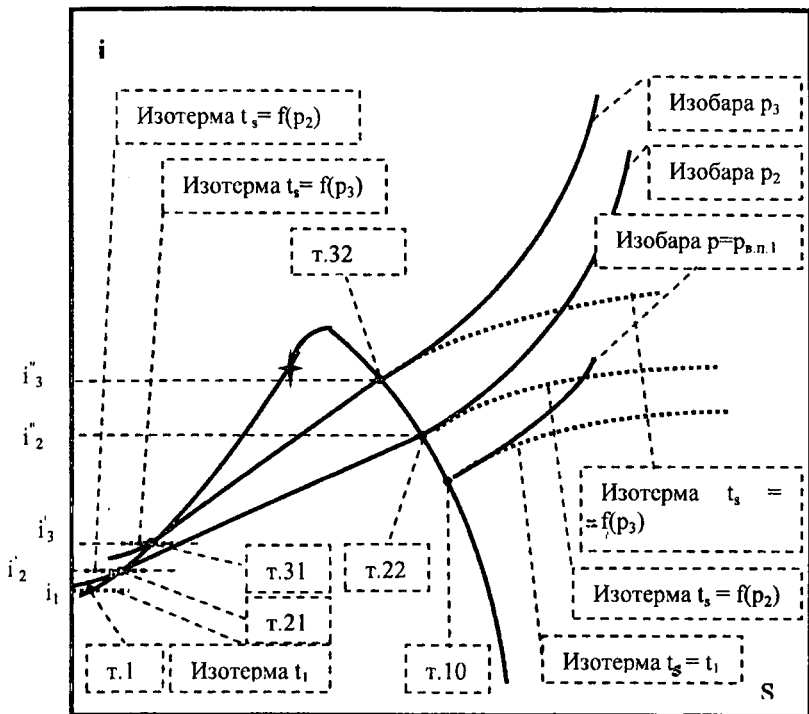


Рис. 3.1. Состояния воды в установке в опытах № 1-3

3). Обработать наблюдение №1:
 рассчитать объемы жидкой воды и влажного воздуха (паровая фаза отсутствует):

$$V = (\pi \cdot d_{\text{вн}}^2 / 4) \cdot h_{\text{ст}}; \quad (3.2)$$

из таблицы “Вода и перегретый водяной пар” (прил. 4) по температуре t_1 и давлению p_1 определить величину удельного объема v_1 (точка 1 на диаграмме рис. 3.1), что позволяет найти массу воды в цилиндре в жидкой фазе:

$$M_{\text{ж.ф.}} = V/v_1; \quad (3.3)$$

определить объем воздуха $V_{\text{в}}$ по формуле (3.2);

т.к. воздух в цилиндре находится в состоянии насыщенного влажного воздуха [5], то можно определить состояние водяных паров в нем как состояние насыщенного пара при температуре $t_s = t_1$ и по таблице прил. 2 вычислить величину v'' и давление насыщения p_s (точка 10 на диаграмме рис. 3.1);

с помощью найденных величин рассчитать массу воды в воздушном объеме цилиндра

$$M_{n.ф} = V_g / v''$$

и парциальное давление сухого воздуха

$$p_{1c.в} = p_1 - p_s;$$

по известным V_g , $p_{1c.в}$ и t_1 из уравнения состояния идеального газа рассчитать массу воздуха в установке M_g .

Из расчетов очевидно, что массой воды в паровой фазе в опыте 1 можно пренебречь, и масса системы определится как $M_c \approx M_{ж.ф}$.

4). Обработать наблюдение № 2.

Процессы кипения с выбросом пара в воздушный объем и конденсации воды, протекающие в пространстве над жидкой фазой, приводят к тому, что воздух отгесняется в верхнюю часть цилиндра. Это подтверждает отсутствие конденсации на стенках верхней части баллона.

Рассчитать протяженность объема цилиндра, занятого воздухом $h_{2в}$, и объем воздуха $V_{2в}$, используя уравнение состояния идеального газа и формулу (3.2) при известных значениях массы воздуха M_g (см. опыт № 1), температуры $\approx t_2$ и давления p_2 ;

найти длину чисто парового объема системы $h_{2н.ф}$ как разность протяженности объема цилиндра, свободного от жидкой фазы, измеренного в опыте, и величины $h_{2в}$;

рассчитать объем паровой фазы $V_{2н}$ по формуле (3.2), зная $h_{2н.ф}$;

определить массу пара (точка 22 на диаграмме рис. 3.1):

$$M_{2н} = V_{2н} / v''_2;$$

масса жидкой фазы $M_{2ж.ф}$ (точка 21 на диаграмме рис. 3.1) в опыте № 2 определится разностью

$$M_c - M_{2н};$$

найти энергию жидкой фазы системы $I_2' = M_2' \cdot i_2'$, энергию паровой фазы $I_2'' = M_2'' \cdot i_2''$ и энергию системы $I_2 = I_2' + I_2''$;

определить массу образующегося пара G_n за единицу времени – подведенная энергия к системе отводится от парового и водяного объемов примерно с одинаковой интенсивностью, что позволяет записать соотношение

$$G_n = U \cdot I \cdot h_{n.ф.} / ((h_{n.ф.} + h_{жс.ф.}) \cdot r). \quad (3.4)$$

5). Обработать наблюдение № 3 (точка 31 и 32 на рис. 3.1) аналогично наблюдению № 2. Полученные результаты сопоставить.

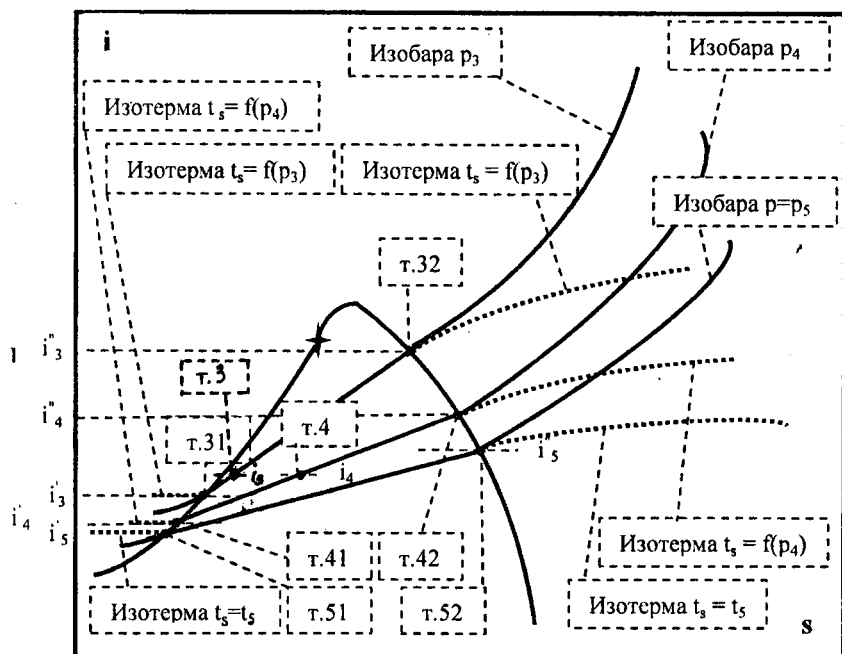


Рис. 3.2. Состояния воды в установке в опытах № 3-5

6). Обработать наблюдение № 4:

определить энтальпию системы: в результате сброса давления от p_3 до p_4 происходит переход системы в состояние с тем же значением энтальпии системы, поскольку ее энергия сохранилась $I_4 = I_3$, (рис. 3.2);

по давлению p_4 из таблиц определить i'_4, i''_4 ;
из системы уравнений

$$\begin{cases} M_{4,s} \cdot i'_4 + M_{4,n} \cdot i''_4 = I_4; \\ M_{4,s} + M_{4,n} = M_c \end{cases} \quad (3.5)$$

найти $M_{4,s}, M_{4,n}$, что позволяет определить x_4 .

Сравнение состояний точки 3 и точки 4 (рис. 3.2) указывает на значительное увеличение степени сухости системы. Понижение давления в системе привело к нарушению состояния фазового равновесия (рис. 5). Система реагирует на это стремлением, с одной стороны, перейти в состояние с меньшим значением μ в новой паре p и t , с другой стороны, выбросом пара сгладить влияние импульса понижения давления. Выброс пара приводит также к повышенному отводу энергии в окружающую среду за счет увеличения поверхности цилиндра, через который происходит рассеяние энергии. В результате такого переходного процесса система приходит к новому состоянию равновесия, что и фиксируется через определенное время в данном опыте.

7). Обработать наблюдение № 5.

При отключении электронагревателя с прекращением подвода энергии прекращается интенсивный процесс кипения. Энергия от стеклянного цилиндра рассеивается в окружающую среду, температура системы понижается. Конденсация пара приводит к нарушению равновесного давления, что объясняет периодическое слабое вскипание воды, приводящее к установлению равновесия. Состояние системы соответствует точке 5, при этом давление и температура непрерывно понижаются, что и наблюдается в опыте.

8). Обработать наблюдения № 6, 7.

С течением времени система приходит в такое состояние, когда парообразование с поверхности обеспечивает поддержание фазового равновесия «пар-жидкость», при этом давление водяных паров снова определяется как парциальное давление во влажном воздухе, равное давлению насыщения, соответствующему температуре системы.

Резким сбросом давления можно изменить ход процессов и снова наблюдать кипение, но уже без подвода энергии от электронагревателя. Подобные процессы осуществляются, например, в рас-

ширительных сосудах систем сброса дренажа тепловых электростанций и котельных, что позволяет снизить рассеяние энергии названных производств за счет утилизации пара, образующегося за счет энергии сбрасываемого в канализацию дренажа. При нештатных ситуациях, связанных с разрушением конструкций трубопроводов сетевой воды, сосудов, содержащих воду при температурах выше температуры насыщения, соответствующей атмосферному давлению, т.е. $\approx 100^\circ\text{C}$, протекают эти же процессы, при этом они весьма опасны для оборудования и персонала.

Начальное состояние соответствует точке 5 (рис. 3.3).

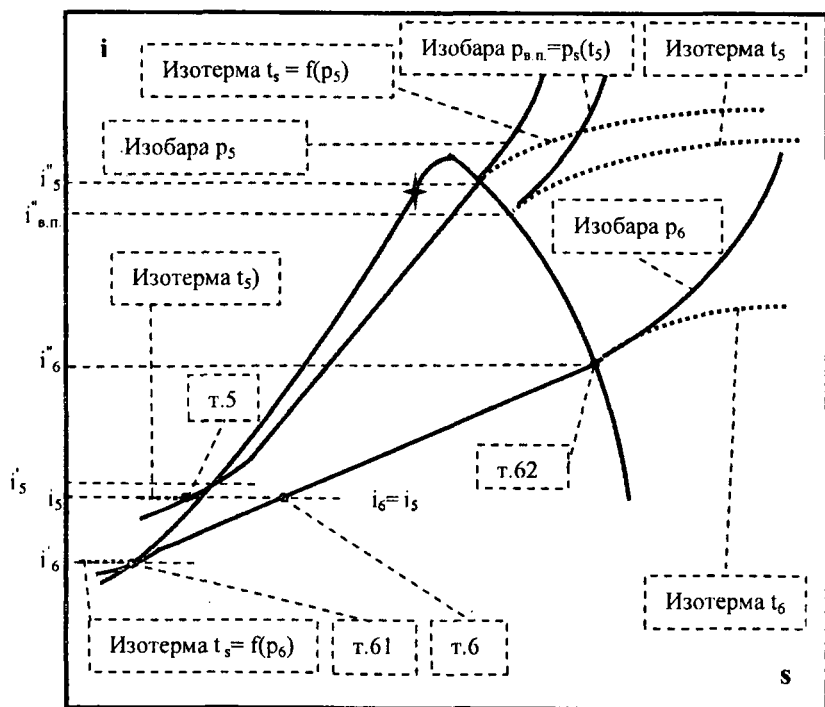


Рис. 3.3. Состояния воды в установке в опытах № 5-7

Энергия системы, можно считать, сосредоточена в жидкой фазе:

$$I_c \approx i_{51} \cdot M_{ж.ф.} \quad (3.6)$$

Сброс давления приводит к тому, что жидкая фаза приходит в состояние перегретой жидкости и вскипает в форме взрыва. Количество образовавшегося пара соответствует степени сухости системы (влажный пар) и массе жидкой фазы (см. рис. 3.3, точка б):

$$M_n = x_6 \cdot M_c. \quad (3.7)$$

Объем образовавшегося пара

$$V_n = v''_6 \cdot M_n. \quad (3.8)$$

В первом приближении, можно считать, что объем системы увеличился в

$$(v''_6 \cdot M_n + v'_6 \cdot M_{ж.ф.}) / (v'_6 \cdot M_c) \text{ раз.} \quad (3.9)$$

Положение точки б определяется двумя изолиниями: изобарой $p = \text{const}$, определяемой новым давлением системы, и изоэнтальпой $i = \text{const}$, поскольку энергия системы, естественно, сохраняется:

$$I_c = i'_6 \cdot M_{ж.ф.} + i''_6 \cdot M''_n \quad (3.10)$$

или

$$i_5 = i'_6 \cdot y_6 + i''_6 \cdot x_6. \quad (3.11)$$

Таким образом, необходимо определить:

энергию системы (3.6):

степень сухости системы в точке б (3.11);

массу образовавшегося пара (3.7);

объем образовавшегося пара (3.8);

во сколько раз увеличился объем (3.9);

массу жидкой фазы (3.10).

Аналогично рассчитать вышеприведенные параметры в точке 7.

9). Построить процессы для каждого опыта в i s- и T s-диаграммах.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные определения, встреченные в данной работе.
2. В каком состоянии будет находиться система в опытах № 6, 7?
3. Что произойдет с системой в опытах № 2-7 при разрушении стеклянной колбы?
4. Что произошло бы с системой при разрушении стеклянной колбы при проведении опытов при избыточном (выше атмосферного) давлении системы?
5. Сколько тройных точек существует у воды?
6. Какая тройная точка считается “основной”?
7. При нарушении фазового равновесия за счет падения давления часть воды переходит в состояние пара. Возможна ли ситуация, когда при подобном понижении давления вся жидкая фаза перейдет в паровую фазу?
8. Чем опасна ситуация разрушения трубопровода с «перегретой» водой, т. е. водой, имеющей в установке температуру выше 100°C ?
9. Как изменяется энергия подобной системы (опыт №6) при резком падении давления?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ И СТЕПЕНИ СУХОСТИ ВЛАЖНОГО ПАРА ВОДЫ

Цель работы

Закрепление основных теоретических сведений, связанных с состоянием влажного пара; экспериментальное определение энтальпии и степени сухости влажного пара; обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Описание установки

Значение энтальпии, а также степени сухости влажного водяного пара можно определить, используя установку, принципиальная схема которой представлена на рис. 4.1.

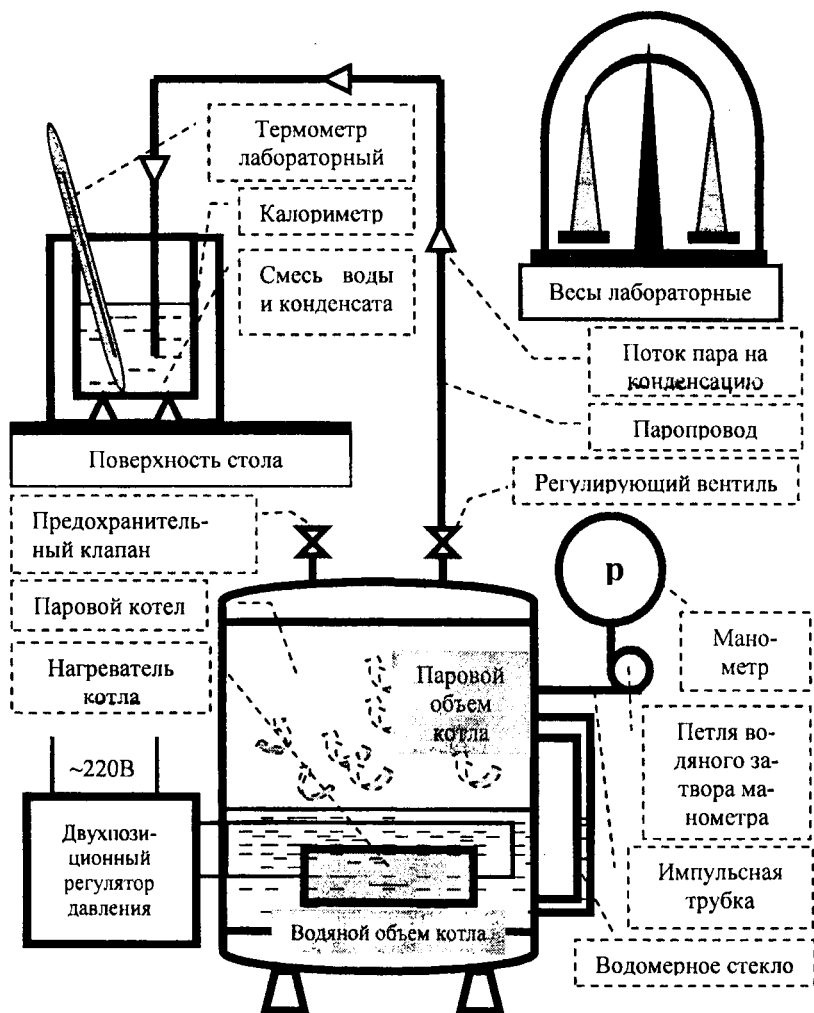


Рис. 4.1. Принципиальная схема лабораторной установки

Паровой котел генерирует влажный пар. Давление пара измеряется манометром.

Поток насыщенного пара (состояние, соответствующее точке 1, рис. 4.2) поступает в паровой трубопровод, снабженный регулирующим вентилем. Проходя указанный участок парового тракта, пар дросселируется ($i = \text{const}$) до состояния, соответствующего точ-

Протокол наблюдений, результатов расчета энтальпии
и степени сухости влажного пара

№ п/п	p , атм	p , атм	M_1 , г	M_2 , г	M_p , г	t_0 , °C	$M_{см}$, г	t_3 , °C	$M_{п}$, г	i , кДж/кг	x , доли
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Параметры окружающей среды: температура $t_{o.c.} = \quad$ °C, барометрическое давление $V = X$ мм рт. ст. = $X \cdot 133,3$ Па.											

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой, распределить функции между исполнителями работы.

✓3. С разрешения преподавателя, в присутствии инженера включить установку и провести наблюдения в нижеприведенной последовательности:

- взвесить пустой калориметр M_1 ;
- взвесить калориметр, заполненный водой, M_2 ;
- измерить температуру воды в калориметре t_0 ;
- измерить давление пара в котле p ;
- подать поток пара в воду калориметра при непрерывном помешивании образующейся смеси (вода и сконденсировавшийся пар) термометром. При достижении температуры смеси $\approx 60^\circ\text{C}$ (t_3) прекратить подачу пара в калориметр;

е) взвесить калориметр со смесью воды и конденсата $M_{см}$.

4. Изменить давление пара в котле (по согласованию с инженером), повторить наблюдения по п. 3.

5. Каждый студент должен выполнить не менее одного самостоятельного опыта.

6. Необходимо обратить внимание на вибрацию стакана калориметра, сопровождающуюся потрескиванием. Вибрация вызвана

гидравлическими ударами, возникающими при схлопывании объема парового пузырька при конденсации пара в объеме воды. Для понимания явления сопоставьте объем влажного пара и объем насыщенной воды при том же давлении.

Обработка результатов измерений

1). На основании данных взвешивания определить массу воды в калориметре и массу пара (конденсата), поступившего в калориметр:

$$M_в = M_2 - M_1; \quad (4.1)$$

$$M_n = M_{см} - M_в. \quad (4.2)$$

2). Определить абсолютное давление пара в котле.

3). Определить энтальпию пара исходя из нижеприведенной методики.

Калориметр представляет собой емкостный теплообменник смешивающего типа. Уравнения балансов массы и энергии для него записываются в следующем виде (рассеянием энергии от калориметра в окружающую среду можно пренебречь):

$$M_n + M_в = M_{см}; \quad (4.3)$$

$$M_n \cdot i_2 + M_в \cdot i_0 = M_{см} \cdot i_3, \quad (4.4)$$

где i_0 , кДж/кг – энтальпия воды, заливаемой в калориметр, при температуре t_0 ;

i_3 , кДж/кг – энтальпия смеси воды и конденсата при температуре t_3 ;

i_2 , кДж/кг – энтальпия влажного пара, поступающего в калориметр.

Необходимые значения энтальпии жидкой воды (например, i_0 и i_3) с достаточной точностью можно рассчитать по соотношению

$$i = c_p \cdot t = 4,187 \cdot t, \text{ кДж/кг}, \quad (4.5)$$

если известна температура воды t , °С.

Из полученных выражений (4.3)–(4.5) находим искомую энтальпию влажного пара

$$i_2 = (M_{см} \cdot i_3 - M_6 \cdot i_0) / M_n, \text{ кДж/кг.} \quad (4.6)$$

Очевидно, что найденное значение должно лежать в пределах $i' < i_x < i''$.

4). Определить энтальпию влажного пара исходя из баланса теплоты.

В ряде случаев баланс энергии процесса смешения масс пара и воды в калориметре записывают в форме, получившей название *баланса теплоты* процесса смешения:

$$Q_{пр.} = Q_{расх.} \quad (4.7)$$

Приходная часть $Q_{пр.}$ последнего уравнения состоит из теплоты процесса изобарной конденсации влажного пара $M_n \cdot (i_2 - i_3)$ и теплоты изобарного переохлаждения полученного конденсата от температуры насыщения при атмосферном давлении до температуры смеси $M_n \cdot (i'_2 - i_3)$.

Расходная часть уравнения баланса теплоты $Q_{расх.}$ состоит из теплоты процесса изобарного нагрева воды от начальной температуры до температуры смеси $M_6 \cdot (i_3 - i_0)$.

Нетрудно убедиться, что при нахождении энтальпии влажного пара из баланса теплоты имеет место один и тот же результат, так как уравнение баланса теплоты есть уравнение баланса энергии, в котором перегруппированы слагаемые.

Рассчитанная энтальпия пара i_2 , находящегося при атмосферном давлении, равна энтальпии отобранной из котла пробы, находившейся при давлении пара в котле. Это обусловлено уравнением

$i = \text{const}$ адиабатного процесса дросселирования 1–2 (рис. 4.2), в котором пар из состояния 1 перешел в состояние 2.

Энтальпия влажного пара состоит из двух составляющих:

$$i_x = i' + r \cdot x, \quad (4.8)$$

где $i' = c_p \cdot t_s = 4,187 \cdot t_s$, кДж/кг – энтальпия насыщенной жидкости;

$r \cdot x$, кДж/кг – теплота конденсации влажного пара, имеющего степень сухости x .

Указанное разделение энтальпии влажного пара важно, прежде всего, потому, что при конденсации потока пара в скоростном бойлере, имеющей место в подавляющем числе случаев технологических процессов, используется лишь второе слагаемое энтальпии влажного пара. Для *переохлаждения конденсата* от температуры конденсации t_s до более низкой температуры $t < t_s$ необходимо поток конденсата направить в другой теплообменник, не связанный с конденсатором.

5). Рассчитать все параметры воды в состоянии 1 и 2 по известным величинам давления и энтальпии влажного пара.

6). Определить степень сухости влажного пара отобранной из котла пробы на основании уравнения (4.8):

$$x = (i_x - i') / r. \quad (4.9)$$

Степень сухости пробы влажного пара в определенной степени случайная величина, зависящая от многих факторов: например, от выполнения заделки отводящего патрубка (рис. 4.3) – от его наклона, от наличия выступа и пр.

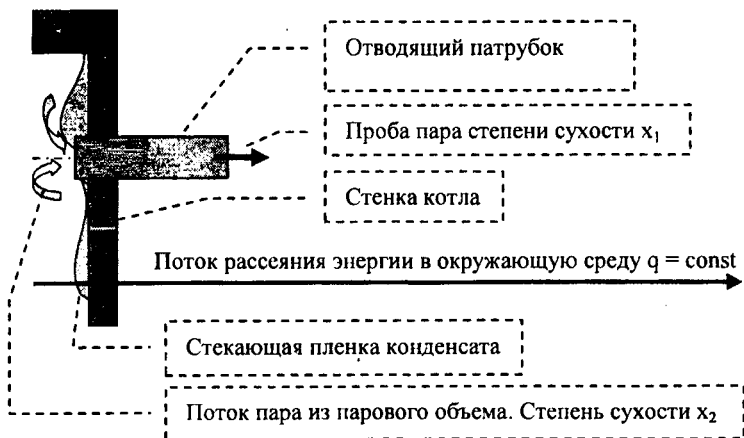


Рис. 4.3. Схема заделки патрубка в стенке котла (вариант)

7). Определить степень сухости влажного пара (x_3), осредненную по всему количеству воды в котле.

Следует понимать, что полученное значение степени сухости влажного пара (п. 5) характеризует лишь состояние пробы пара x_1 . Объем котла занимают жидкая насыщенная фаза и влажный пар. Осредненная степень сухости этого влажного пара равна x_2 , а осредненная степень сухости влажного пара по всему количеству воды в котле равна x_3 . Степень сухости (x_3) можно определить согласно следующей методике: принимаем в первом приближении $x_2 = x_1$, тогда удельный объем влажного пара в паровом объеме котла определится как $v_x = v' \cdot (1 - x) + v'' \cdot x$ (в зависимости от давления пара в котле). Общий объем котла составляет $V_k = v' \cdot M_{\text{макс.ж.ф}}$ ($M_{\text{макс.ж.ф}} = 20$ кг – масса жидкой фазы при полном заполнении котла). Определяем массу жидкой фазы в котле по уровню воды h в водомерном стекле:

$$M_{\text{ж.ф.}} = M_{\text{макс.ж.ф.}} \cdot h / h_{\text{макс}}, \quad (4.10)$$

где $h_{\text{макс}}$ – возможное максимальное значение уровня воды в котле.

Зная массу жидкой фазы, можно определить ее объем ($V_{\text{ж.ф.}} = v' \cdot M_{\text{ж.ф.}}$) и, следовательно, массу влажного пара в паровом объеме котла, соответствующую уровню h , как $M_n = (V_k - V_{\text{ж.ф.}}) / v_x$. Тогда степень сухости влажного пара x_3 , осредненная по всему количеству воды в котле, составляет $x_3 = V_n / V_k$.

Подобная неоднородность потока влажного пара имеет место практически во всех случаях использования данного состояния. Как это показано выше, в результате указанного обстоятельства чрезвычайно сложно измерить влажность пара в потоке. Другим следствием неоднородности потока влажного пара является необратимость течения из-за рассогласования скоростей составляющих влажного пара и неизбежного при этом увеличения трения в потоке, как внешнего, так и внутреннего. Поток влажного пара термодинамически крайне несовершенен – это надо помнить и понимать.

8). Процессы, изображенные на рис. 4.2 в i -диаграмме, постройте в T -и p -диаграммах.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные определения, встреченные в данной работе.

2. В каких пределах может находиться численное значение энтальпии влажного пара при данном давлении, степени сухости?

3. Как установить положение точки 2 в конце процесса дросселирования, если заканчивается процесс в области:

а) влажного пара?

б) перегретого пара (рис. 4.2)?

4. Как рассчитать теплоемкость жидкой воды при давлении до 10 МПа?

5. Определите количество теплоты, необходимое для перевода влажного пара в состояние насыщенного пара.

6. Нарисуйте сечение паропровода влажного пара и покажите распределение в нем потоков составляющих компонентов влажного пара.

7. Зарисуйте схему распределения потока влажного пара в трубопроводе при повороте последнего.

8. Получите из уравнения энергии процесса смешения воды и пара в калориметре уравнение теплового баланса указанного процесса.

9. Определите теплоту конденсации влажного пара из состояния 1, протекающей при давлении p_1 , и конденсации из состояния 2 при давлении $p = B$.

10. Объясните причину вибрации стакана калориметра в опыте в момент конденсации парового потока. Как похожее явление, возникающее при работе насосов, называется и к чему оно приводит в конечном итоге?

11. Чему равна постоянная интегрирования i_0 при определении энтальпии воды?

12. Почему принципиально невозможно точное определение степени сухости потока влажного пара?

13. Почему на стенке котла (на стенке трубопровода) в паровом объеме неизбежно присутствует пленка жидкой фазы?

14. Рассчитайте все параметры влажного пара в состоянии, осредненном на все количество воды в объеме котла.

15. Оцените погрешность, связанную с рассеиваемой в окружающую среду энергией от калориметра.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ВОДЫ

Цель работы

Закрепление основных теоретических сведений, связанных с состоянием перегретого пара; экспериментальное определение энтальпии перегретого пара; обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Описание установки

Принципиальная схема установки, с помощью которой можно определить значение энтальпии перегретого пара, представлена на рис. 5.1.

Паровой котел генерирует влажный пар. Избыточное давление пара измеряется манометром.

Поток насыщенного пара (состояние, соответствующее точке 1, рис. 5.2) поступает в паровой трубопровод, снабженный регулирующим вентилем. Проходя участок парового тракта, пар дросселируется ($i = \text{const}$) до состояния, соответствующего точке 2, в результате чего его давление понижается до атмосферного. Далее поток пара попадает в пароперегреватель, где доводится до перегретого состояния в изобарном процессе. Требуемая для этого теплота процесса поступает от электронагревателя. В зависимости от состояния в конце процесса дросселирования точки 2 или точки 21 пар в перегревателе подсушивается и перегревается либо только перегревается. На выходе из пароперегревателя состояние перегретого пара соответствует точке 3. Температура пара за перегревателем измеряется хромель-копелевой термопарой в комплекте с милливольтметром.

Далее поток перегретого пара попадает в теплообменник – охладитель перегрева пара, в котором от пара отводится теплота перегрева и он переходит в состояние сухого насыщенного пара.

Из теплообменника пар направляется в конденсатор, где вода переходит в жидкое насыщенное состояние (точка b), а затем в жидкое состояние (точка 0) с температурой t_0 .

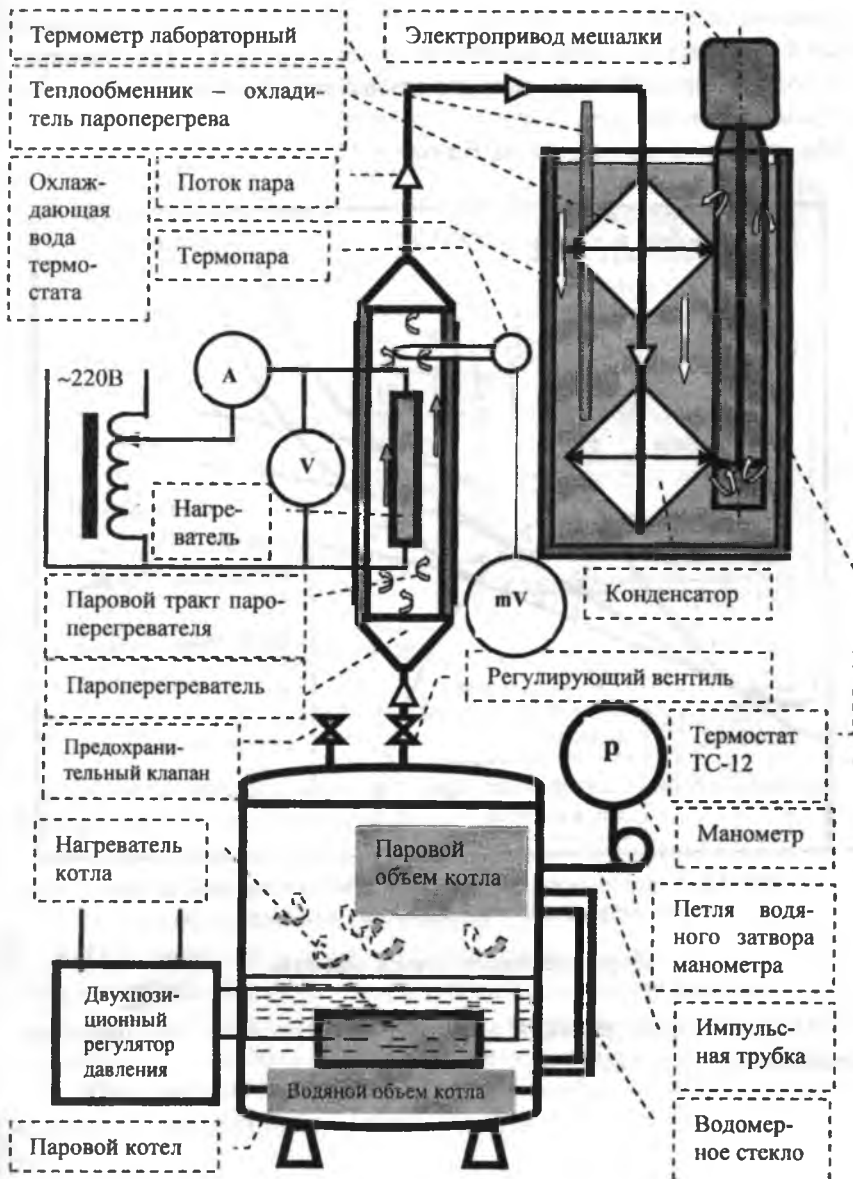


Рис. 5.1. Принципиальная схема лабораторной установки

Теплота изобарного перехода из состояния точки 3 в состояние точки 4 передается охлаждающей воде термостата ТС-12. Температура воды в термостате до и после пропуска пара измеряется лабораторным термометром.

Масса воды в термостате M_a близка к 12 кг.

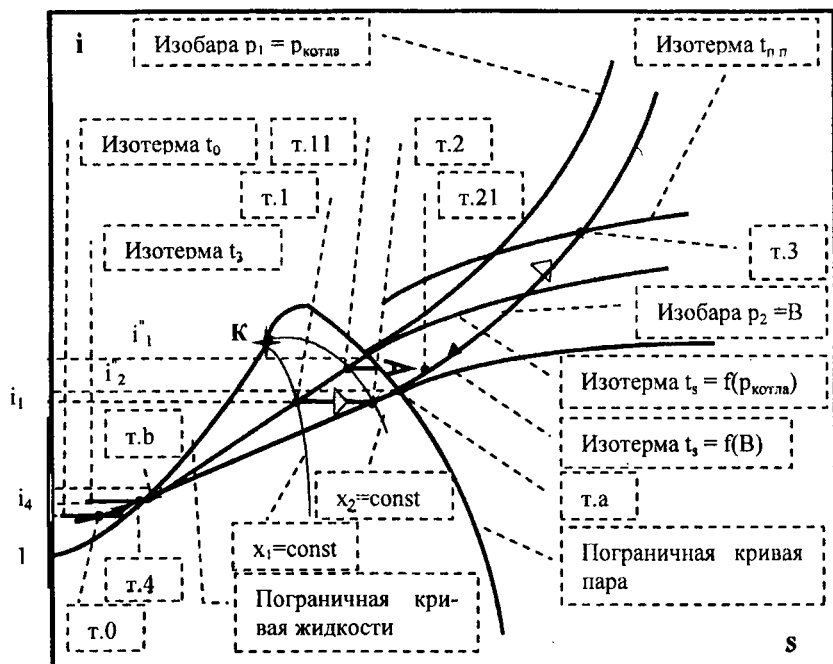


Рис. 5.2. Процессы изменения состояния воды в паровом канале, пароперегревателе и теплообменниках calorиметра

Порядок проведения работы

1. Изучить теоретический материал и заготовить протокол наблюдений в форме табл. 5.1.

Протокол наблюдений, результатов расчета энтальпии
перегретого пара

№ п/п	Давление пара в котле		Температура перегретого пара $t_{пн}$		Температура воды термостата, °С		Масса конденсата M_k , кг	Энтальпия перегретого пара $i_{пн}$, кДж/кг		Погрешность определения Δi	
	р, аги	р, ага	mV	°С	начальная $t_{1в}$	конечная $t_{2в}$		$i_r=f(p, t_{пн})$ (по табл.)	$i_k=i_3$ (расчет.)	i_r-i_k , кДж/кг	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Параметры окружающей среды: температура $t_{о.с.} =$ °С, барометрическое давление $B = X$ мм рт. ст. = $X \cdot 133,3$ Па.											

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой, распределить функции между исполнителями работы.

3. С разрешения преподавателя, в присутствии инженера включить установку.

4. Измерить давление пара в котле.

5. Пар пропустить в пароперегреватель и вывести установку на установившийся режим, о чем судят по постоянству всех параметров.

6. Включить мешалку термостата, замерить температуру воды в термостате $t_{1в}$ и начать подавать пар в теплообменники термостата.

7. При заполнении емкости теплообменников конденсатом прекратить подачу пара и замерить конечную температуру в калориметре $t_{2в}$.

8. Перелить конденсат из теплообменников в мерный сосуд.

9. Изменить давление пара в котле (по согласованию с инженером), повторить измерения начиная с п. 4.

10. Совместно с инженером выключить установку.

Обработка результатов измерений

1). Определить массу конденсата, приняв плотность воды 1000 кг/м^3 и определив объем конденсата в мерном сосуде.

2). Определить абсолютное давление пара в котле.

3). Определить энтальпию перегретого пара i_m по таблицам “Вода и перегретый водяной пар”, зная давление пара в котле и температуру перегретого пара, определенную по данным термометра.

4). Определить энтальпию перегретого пара i_k по данным калориметрирования исходя из нижеприведенной методики:

Калориметр представляет собой емкостный теплообменник поверхностного типа. Уравнение баланса энергии для него записывается в следующем виде (рассеянием энергии от калориметра в окружающую среду пренебрегаем):

$$M_k \cdot i_3 + M_\theta \cdot i_0 = M_k \cdot i_4 + M_\theta \cdot i_4, \quad (5.1)$$

где i_0 , кДж/кг – энтальпия воды, поступающей в термостат, при температуре $t_0 = t_{1\theta}$;

i_3 , кДж/кг – энтальпия перегретого пара;

i_4 , кДж/кг – энтальпия воды в термостате при температуре $t_4 = t_{2\theta}$ после пропуска пара;

M_k , кг – масса сконденсированного пара;

M_θ , кг – масса воды в термостате ($\approx 12 \text{ кг}$).

Необходимые значения энтальпии жидкой воды (например, i_0 и i_4) с достаточной точностью можно рассчитать по соотношению

$$i = c_p \cdot t = 4,187 \cdot t, \text{ кДж/кг}, \quad (5.2)$$

если известна температура воды $t, ^\circ\text{C}$.

Из полученного выражения находим искомую энтальпию перегретого пара

$$i_3 = ((M_k + M_\theta) \cdot i_4 - M_\theta \cdot i_0) / M_k. \quad (5.3)$$

5). Используя данные опытов, проведенных в лабораторной работе № 4, рассчитать составляющие энтальпии перегретого пара в состоянии точки 3, а также определить теплоту, подведенную к пару в пароперегревателе для перевода его из состояния точки 2 в состояние точки 3.

6). Рассчитать все параметры перегретого пара по таблицам “Вода и перегретый водяной пар” и определить его внутреннюю энергию ($u = i - p \cdot v$), энергию Гельмгольца ($A = U - T \cdot S$) и энергию Гиббса ($G = I - T \cdot S$).

7). Процессы, изображенные на рис. 5.2 в i s-диаграмме, постройте в T s- и p v-диаграммах.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные определения, встреченные в данной работе.

2. В каких пределах может находиться численное значение энтальпии перегретого пара при данном давлении?

3. Как установить положение точки 2 в конце процесса дросселирования 1 – 2? Заканчивается процесс 11 – 21 в области влажного пара или в области перегретого пара (рис. 5.2)?

4. Какие составляющие энтальпии перегретого пара вы знаете? Запишите выражение для энтальпии перегретого пара с помощью этих составляющих.

5. Определите количество теплоты, необходимое для перевода влажного пара в состояние перегретого пара.

6. Запишите уравнение баланса теплоты процесса теплообмена между водой в термостате и пара в калориметре при изобарном переходе последнего из состояния точки 3 в состояние точки 4 (рис. 5.2).

7. Чему равна постоянная интегрирования i_0 при определении энтальпии воды?

8. Сколько теплообменников потребуется для перевода перегретого пара в состояние переохлажденного конденсата? Объясните свой ответ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМОСТИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Цель работы

Закрепление основных теоретических сведений по калорическим свойствам реальных газов; экспериментальное определение изобарной массовой средней теплоемкости перегретого водяного пара при атмосферном давлении; обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Описание установки

Значение изобарной массовой средней теплоемкости перегретого водяного пара при атмосферном давлении достаточно просто определяется с помощью установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 6.1.

Паровой котел (10), имеющий нагреватель (1), генерирует влажный пар. Давление пара превышает атмосферное на величину Δp , определяемую сопротивлением парового тракта на участке «выходное сечение котла – выходное сечение конденсатора». В сравнении с абсолютным давлением пара, равным $\sim 10^5$ Па, величина $\Delta p \approx 50$ Па мала, и ею можно пренебречь в данном исследовании.

Поток насыщенного пара (состояние точки 1, рис. 6.2) поступает в паровой канал и проходит участок подсушки и перегрева, где к нему изобарно подводится энергия от электронагревателя (2), в результате чего пар переходит в состояние точки 2. Важно быть уверенным в том, что пар перед экспериментальным участком не насыщенный. Для этого необходимо, чтобы показания термпары № 1 (8) превышали значение температуры насыщения воды при атмосферном давлении, равное $\approx 100^\circ\text{C}$.

В состоянии 2, с давлением, равным атмосферному, и известной температурой, пар поступает на экспериментальный участок. Здесь от основного нагревателя (3) к нему изобарно подводится энергия в количестве, измеряемом с помощью амперметра и вольтметра. На

выходе участка (состояние 3) температура пара измеряется термопарой № 2 (6). Для исключения влияния потерь энергии пара в окружающую среду рабочий участок парового канала (5) снаружи омывается охранным потоком пара (4), направляющимся в конденсатор (7).
 выходящего участка (состояние 3) температура пара измеряется термопарой № 2 (6). Для исключения влияния потерь энергии пара в окружающую среду рабочий участок парового канала (5) снаружи омывается охранным потоком пара (4), направляющимся в конденсатор (7).

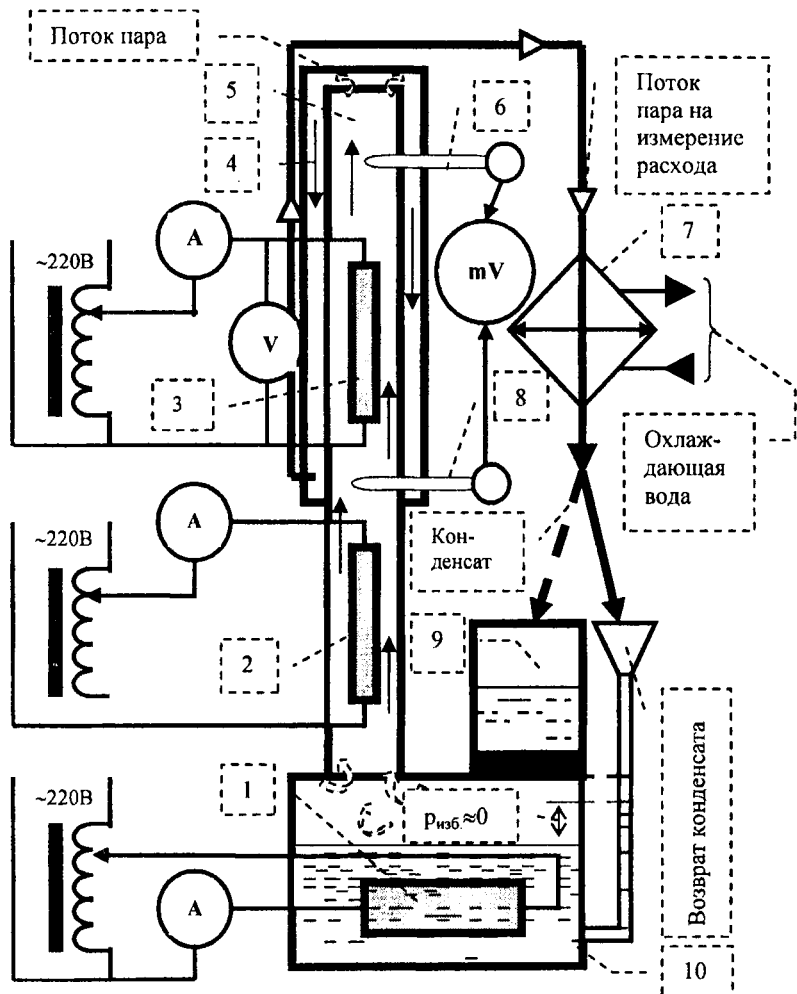


Рис. 6.1. Принципиальная схема лабораторной установки

Далее пар направляется в конденсатор, где вода переходит в жидкое состояние и направляется в мерную емкость (9) либо в котел. Объем воды в мерной емкости, собранный за время эксперимента, позволяет найти массу сконденсировавшегося пара, поскольку плотность воды в данных условиях известна и равна $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$.

В итоге получаем все данные для расчета искомой величины теплоемкости:

$$\bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = Q / (G_n \cdot (t_2 - t_1)). \quad (6.1)$$

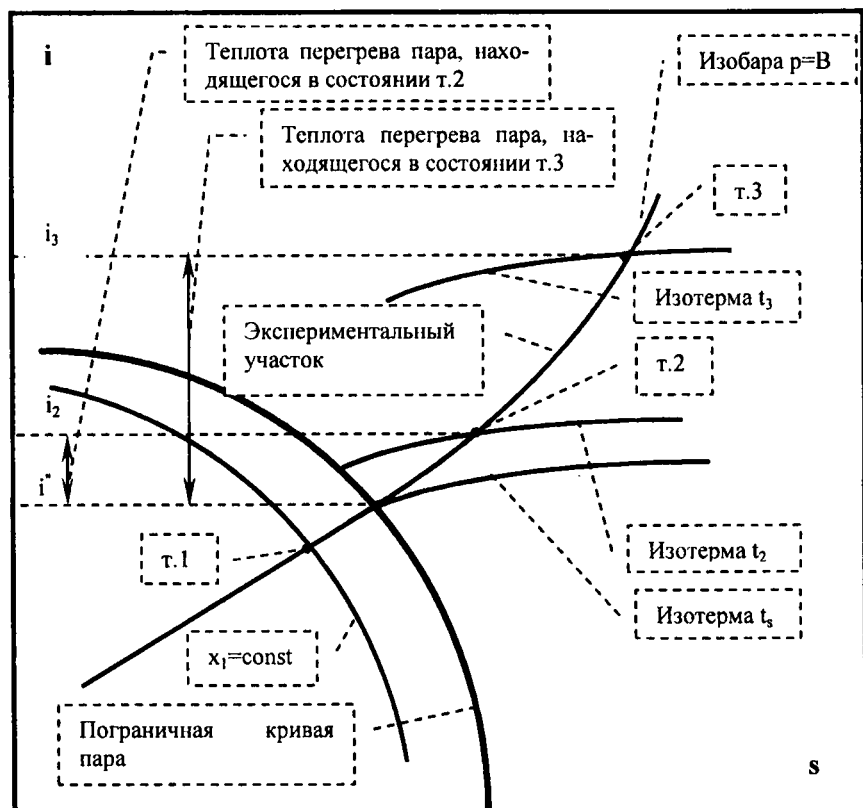


Рис. 6.2. Процессы изменения состояния водяного пара в паровом канале

Порядок проведения работы

1. Изучить теоретический материал и приготовить протокол наблюдений в форме табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1

Протокол наблюдений и результатов расчета
изобарной массовой средней теплоемкости перегретого
водяного пара при атмосферном давлении

№ п/п	$\Delta U, В$	$I, А$	$\tau, с$	$G_{п}, г$	t_2, mV	$t_2, ^\circ C$	t_3, mV	$t_3, ^\circ C$	$\bar{c}_p _{t_2}^{t_3},$ кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметры окружающей среды: температура $t_{o,c} = \quad ^\circ C$, барометрическое давление $B = X$ мм рт. ст. = $X \cdot 133,3$ Па.									

2. Ознакомиться с экспериментальной установкой, распределить функции между исполнителями работы.

3. С разрешения преподавателя, в присутствии инженера включить установку и провести наблюдения в нижеприведенной последовательности:

а) установить исходные падения напряжения на нагревательных элементах;

б) зафиксировать показания термопар по достижении стационарного состояния. Показания термопары №1 должны превышать температуру насыщения воды при атмосферном давлении. Температура измеряется с помощью хромель-копелевых термопар в комплекте с милливольтметром, показания которого переводятся в градусы в соответствии с зависимостью $t = f(U)$;

в) собрать конденсат в мерный сосуд при неизменных показаниях приборов ($U, I = \text{const}$) за фиксированное время опыта τ .

4. По согласованию с инженером изменить мощности нагревателей (о чем судят по показаниям амперметров) и для нового режима повторить измерения.

5. Совместно с инженером выключить установку.

Обработка результатов измерений

1). Определить массу конденсата G_n , приняв плотность воды 1000 кг/м^3 и определив объем конденсата в мерном сосуде.

2). Определить количество теплоты, полученное паром в процессе 2-3 на экспериментальном участке:

$$Q = U \cdot I \cdot \tau, \text{Дж.} \quad (6.2)$$

3). Определить экспериментальное значение изобарной массовой средней теплоемкости перегретого водяного пара при атмосферном давлении согласно формуле (6.1). Полученное значение занести в табл. 6.1.

4). Определить значения энтальпии перегретого пара в точках 2 и 3 (i_3 и i_2 соответственно) по таблице “Вода и перегретый пар” или по диаграммам.

5). Определить расчетное значение изобарной массовой средней теплоемкости перегретого водяного пара при атмосферном давлении, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, зная экспериментальные значения температур в точках процесса 2-3:

$$\bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (i_3 - i_2) / (t_3 - t_2). \quad (6.3)$$

6). Сопоставить полученные значения теплоемкостей, проанализировать их величины и причины расхождения значений.

7). Процессы, изображенные на рис. 6.2 в i s-диаграмме, постройте в T s- и p v-диаграммах.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные определения, встреченные в данной работе.

2. Какие значения принимает изобарная теплоемкость воды при изменении давления и температуры?
3. При каких условиях теплоемкость воды перестает зависеть от других параметров кроме температуры?
4. Чему равна теплоемкость воды в идеально газовом состоянии?
5. Как используется теплоемкость воды при проверке уравнения состояния?
6. Как изменятся данные эксперимента при нарушении требования о превышении температуры пара в состоянии 2 в данной работе над температурой насыщения?
7. Почему в районе критической точки изобары теплоемкости имеют экстремумы – максимумы значений?
8. Объясните факт, указывающий, что для воды область идеально газового состояния имеет значительно большие значения температур, чем для диоксида углерода CO_2 , кислорода O_2 , азота N_2 .
9. Как на основании полученных данных рассчитать объемную теплоемкость воды?
10. Как, используя теплоемкость, рассчитать теплоту перегрева пара?

Л и т е р а т у р а

1. ГСССД 98 – 86. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0 ... 800°C и давлениях 0,001 ... 1000 МПа. – М.: Издательство стандартов, 1986.
2. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1976. – 166 с.
3. Р и в к и н С.Л., А л е к с а н д р о в А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
4. Р и в к и н С.Л. Термодинамические свойства газов. – М.: Энергия, 1974.
5. З у б а р е в В.Н. и др. Практикум по технической термодинамике: Учеб. пособие для вузов/В.Н. Зубарев, А.А. Александров, В.С. Охотин. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
6. У э й л е с С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2 ч. Ч.1 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 304 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Термодинамические свойства диоксида углерода в состоянии насыщения (по температурам)

№ п/п	T, К	p, МПа	$v' \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'' \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$
1	288	5,066	1,2171	6,2543
2	290	5,316	1,2439	5,8089
3	292	5,575	1,2744	5,3772
4	294	5,845	1,3096	4,9552
5	295	5,983	1,3294	4,7463
6	296	6,124	1,3512	4,5378

Удельный объем диоксида углерода ($v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$) в состояниях жидкости и перегретого пара

Т, К	Давление, МПа													
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
285	86,51	64,06	50,58	41,56	35,12	30,28	26,51	23,485	14,28	9,430	1,175	1,154	1,137	1,123
290	88,26	65,36	51,65	42,50	35,95	31,03	27,20	24,11	14,79	9,949	6,729	1,219	1,192	1,171
295	89,93	66,67	52,74	43,42	36,76	31,76	27,86	24,74	15,29	10,42	7,299	1,328	1,270	1,234

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам) (международной системе единиц)

t , °C	$p \cdot 10^5$, Па	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8
0,00	0,006108	0,0010002	206,321	-0,04	2501,0	-0,0002	9,1565
5	0,008718	0,0010000	147,167	21,01	2510,2	0,0762	9,0258
10	0,012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	0,1510	8,9009
15	0,017041	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	0,2243	8,7815
20	0,023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	0,2963	8,6674
25	0,031663	0,0010029	43,399	104,77	2546,8	0,3670	8,5583
30	0,042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	0,4365	8,4537
35	0,056217	0,0010060	25,246	146,56	2565,0	0,5049	8,3536
40	0,073749	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	0,5721	8,2576
45	0,095817	0,0010099	15,278	188,35	2582,9	0,6383	8,1655
50	0,12335	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	0,7035	8,0771
55	0,15740	0,0010145	9,5812	230,17	2600,7	0,7677	7,9922
60	0,19919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	0,8310	7,9106
65	0,25008	0,0010199	6,2042	272,02	2618,2	0,8933	7,8320
70	0,31161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	0,9548	7,7565
75	0,38548	0,0010259	4,1356	313,94	2635,3	1,0154	7,6837
80	0,47359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	1,0752	7,6135
85	0,57803	0,0010326	2,8300	355,92	2652,1	1,1343	7,5459
90	0,70108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	1,1925	7,4805
95	0,84525	0,0010398	1,9832	397,99	2668,4	1,2500	7,4174
100	1,01325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	1,3069	7,3564
105	1,20799	0,0010477	1,4200	440,17	2684,1	1,3630	7,2974
110	1,4326	0,0010519	1,2106	461,32	2691,8	1,4185	7,2402
115	1,6905	0,0010562	1,0369	482,50	2699,3	1,4733	7,1848
120	1,9854	0,0010606	0,89202	503,7	2706,6	1,5276	7,1310
125	2,3209	0,0010652	0,77067	525,0	2713,8	1,5813	7,0788
130	2,7012	0,0010700	0,66851	546,3	2720,7	1,6344	7,0281
135	3,1306	0,0010750	0,58212	567,7	2727,4	1,6869	6,9787
140	3,6136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	1,7390	6,9307
145	4,1550	0,0010853	0,44618	610,6	2740,3	1,7906	6,8838
150	4,7597	0,0010908	0,39261	632,2	2746,3	1,8416	6,8381
155	5,4331	0,0010964	0,34656	653,8	2752,1	1,8923	6,7934
160	6,1804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	1,9425	6,7498
165	7,0075	0,0011082	0,27246	697,3	2763,0	1,9922	6,7070
170	7,9202	0,0011145	0,24259	719,1	2768,0	2,0416	6,6652

1	2	3	4	5	6	7	8
175	8,9246	0,0011209	0,21656	741,1	2772,7	2,0906	6,6241
180	10,027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2,1393	6,5838
185	11,234	0,0011344	0,17385	785,3	2781,2	2,1876	6,5441
190	12,552	0,0011415	0,15631	807,5	2784,9	2,2356	6,5052
195	13,989	0,0011489	0,14082	829,9	2788,3	2,2833	6,4667
200	15,551	0,0011565	0,12714	852,4	2791,4	2,3307	6,4289
205	17,245	0,0011644	0,11500	875,0	2794,1	2,3778	6,3915
210	19079	0,0011726	0,10422	897,8	2796,4	2,4247	6,3546
215	21,063	0,0011811	0,09460	920,6	2798,4	2,4714	6,3181
220	23,201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	2,5178	6,2819
225	25,504	0,0011992	0,07833	966,9	2801,0	2,5641	6,2460
230	27,979	0,0012087	0,07143	990,3	2801,7	2,6102	6,2104
235	30,635	0,0012186	0,06523	1013,9	2801,9	2,6562	6,1749
240	33,480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	2,7021	6,1397
245	36,524	0,0012399	0,05459	1061,6	2800,8	2,7479	6,1045
250	39,776	0,0012513	0,05002	1085,8	2799,5	2,7936	6,0693
255	43,245	0,0012632	0,04588	1110,3	2797,7	2,8393	6,0341
260	46,940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	2,8850	5,9989
265	50,872	0,0012887	0,03870	1160,0	2792,1	2,9308	5,9635
270	55,051	0,0013025	0,03557	1185,4	2788,3	2,9766	5,9278
275	59,487	0,0013170	0,03272	1211,0	2783,8	3,0226	5,8918
280	64,191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	3,0687	5,8555
285	69,174	0,0013487	0,02771	1263,4	2772,4	3,1150	5,8186
290	74,448	0,0013659	0,02551	1290,3	2765,4	3,1616	5,7811
295	80,025	0,0013844	0,02348	1317,6	2757,5	3,2085	5,7428
300	85,917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	3,2559	5,7038
305	92,136	0,0014252	0,01989	1373,9	2738,3	3,3037	5,6637
310	98,697	0,0014480	0,01829	1402,9	2726,8	3,3522	5,6224
315	105,61	0,0014726	0,01681	1432,7	2714,0	3,4013	5,5798
320	112,90	0,0014995	0,01544	1463,4	2699,6	3,4513	5,5356
325	120,57	0,0015289	0,01416	1494,9	2683,6	3,5023	5,4896
330	128,65	0,0015614	0,01296	1527,5	2665,5	3,5546	5,4414
335	137,14	0,0015977	0,01184	1561,4	2645,4	3,6084	5,3906
340	146,08	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	3,6638	5,3363
345	155,48	0,0016859	0,009779	1633,7	2596,2	3,7211	5,2782
350	165,37	0,0017407	0,008822	1672,9	2566,1	3,7816	5,2149
355	175,77	0,0018073	0,007895	1715,5	2530,5	3,8467	5,1442
360	186,74	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	3,9189	5,0603
365	198,30	0,002015	0,006013	1819,5	2424,2	4,0041	4,9517
370	210,53	0,002231	0,004958	1896,2	2335,7	4,1198	4,8031
374	220,84	0,002834	0,003482	2039,2	2150,7	4,3374	4,5096

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) (в международной системе единиц)

$p \cdot 10^5$, Па	t , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8
0,010	6,982	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	0,1060	8,9756
0,015	13,034	0,0010006	87,982	54,71	2525,0	0,1956	8,8278
0,020	17,511	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	0,2606	8,7236
0,025	21,094	0,0010020	54,256	88,44	2539,7	0,3119	8,6431
0,030	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	0,3543	8,5776
0,035	26,692	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	0,3907	8,5224
0,040	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	0,4224	8,4747
0,045	31,034	0,0010046	31,142	129,98	2557,8	0,4507	8,4327
0,050	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	0,4762	8,3952
0,060	36,18	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	0,5209	8,3305
0,070	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	0,5591	8,2760
0,080	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	0,5926	8,2289
0,090	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	0,6224	8,1875
0,10	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	0,6493	8,1505
0,11	47,71	0,0010111	13,418	199,68	2587,8	0,6738	8,1171
0,12	49,45	0,0010119	12,364	206,94	2590,9	0,6963	8,0867
0,13	51,06	0,0010126	11,467	213,70	2593,7	0,7172	8,0588
0,14	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	0,7367	8,0330
0,15	54,00	0,0010140	10,025	225,98	2598,9	0,7549	8,0089
0,20	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	0,8321	7,9092
0,25	64,99	0,0010199	6,2060	271,99	2618,1	0,8932	7,8321
0,30	69,12	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	0,9441	7,7695
0,40	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	1,0261	7,6711
0,50	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	1,0912	7,5951
0,60	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	1,1454	7,5332
0,70	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	1,1921	7,4811
0,80	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	1,2330	7,4360
0,90	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	1,2696	7,3963
1,00	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	1,3027	7,3608
1,1	102,32	0,0010455	1,5501	428,84	2680,0	1,3330	7,3288
1,2	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	1,3609	7,2996
1,3	107,13	0,0010495	1,3258	449,19	2687,4	1,3868	7,2728
1,4	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	1,4109	7,2480
1,5	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	1,4336	7,2248
1,6	113,32	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	1,4550	7,2032
1,7	115,17	0,0010563	1,0315	483,22	2699,5	1,4752	7,1829
1,8	116,93	0,0010579	0,97775	490,70	2702,1	1,4944	7,1638
1,9	118,62	0,0010594	0,92951	497,85	2704,6	1,5127	7,1458

1	2	3	4	5	6	7	8
2,0	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	1,5301	7,1286
2,1	121,78	0,0010623	0,84636	511,3	2709,2	1,5468	7,1123
2,2	123,27	0,0010636	0,81027	517,6	2711,3	1,5628	7,0967
2,3	124,71	0,0010650	0,77724	523,7	2713,3	1,5781	7,0819
2,4	126,09	0,0010663	0,74684	529,6	2715,3	1,5929	7,0676
2,5	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	1,6072	7,0540
2,6	128,73	0,0010688	0,69288	540,9	2719,0	1,6209	7,0409
2,7	129,98	0,0010700	0,66878	546,2	2720,7	1,6342	7,0282
2,8	131,20	0,0010712	0,64636	551,4	2722,3	1,6471	7,0161
2,9	132,39	0,0010724	0,62544	556,5	2723,9	1,6596	7,0044
3,0	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	1,6717	6,9930
3,1	134,66	0,0010746	0,58750	566,2	2727,0	1,6834	6,9820
3,2	135,76	0,0010757	0,57027	570,9	2728,4	1,6948	6,9714
3,3	136,82	0,0010768	0,55402	575,5	2729,8	1,7059	6,9611
3,4	137,86	0,0010779	0,53871	579,9	2731,2	1,7168	6,9511
3,5	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2732,5	1,7273	6,9414
3,6	139,87	0,0010799	0,51056	588,5	2733,8	1,7376	6,9320
3,7	140,84	0,0010809	0,49758	592,7	2735,0	1,7476	6,9228
3,8	141,79	0,0010819	0,48527	596,8	2736,2	1,7575	6,9138
3,9	142,72	0,0010829	0,47357	600,8	2737,4	1,7670	6,9051
4,0	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	1,7764	6,8966
4,1	144,52	0,0010848	0,45181	608,5	2739,7	1,7856	6,8883
4,2	145,39	0,0010858	0,44168	612,3	2740,7	1,7946	6,8802
4,3	146,25	0,0010867	0,43201	616,0	2741,8	1,8034	6,8723
4,4	147,09	0,0010876	0,42276	619,6	2742,8	1,8120	6,8645
4,5	147,92	0,0010885	0,41392	623,2	2743,8	1,8204	6,8570
5,0	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	1,8604	6,8215
6,0	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	1,9308	6,7598
7,0	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	1,9918	6,7074
8,0	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2,0457	6,6618
9,0	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2,0941	6,6212
10,0	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2,1382	6,5847
11,0	184,06	0,0011331	0,17739	781,1	2780,4	2,1786	6,5515
12,0	187,96	0,0011386	0,16320	798,4	2783,4	2,2160	6,5210
13,0	191,60	0,0011438	0,15112	814,7	2786,0	2,2509	6,4927
14,0	195,04	0,0011489	0,14072	830,1	2788,4	2,2836	6,4665
15,0	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	2,3144	6,4418
16,0	201,37	0,0011586	0,12368	858,6	2792,2	2,3436	6,4187
17,0	204,30	0,0011633	0,11661	871,8	2793,8	2,3712	6,3967
18,0	207,10	0,0011678	0,11031	884,6	2795,1	2,3976	6,3759
19,0	209,79	0,0011722	0,10464	896,8	2796,4	2,4227	6,3561
20,0	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	2,4468	6,3373

1	2	3	4	5	6	7	8
21,0	214,85	0,0011808	0,09488	919,9	2798,3	2,4699	6,3192
22,0	217,24	0,0011850	0,09064	930,9	2799,1	2,4922	6,3018
23,0	219,54	0,0011891	0,08676	941,6	2799,8	2,5136	6,2851
24,0	221,78	0,0011932	0,08319	951,9	2800,4	2,5343	6,2691
25,0	223,94	0,0011972	0,07990	962,0	2800,8	2,5543	6,2536
26,0	266,03	0,0012011	0,07685	971,7	2801,2	2,5736	6,2386
27,0	228,06	0,0012050	0,07402	981,2	2801,5	2,5924	6,2241
28,0	230,04	0,0012088	0,07138	990,5	2801,7	2,6106	6,2101
29,0	231,96	0,0012126	0,06892	999,5	2801,8	2,6283	6,1964
30,0	233,84	0,0012163	0,06662	1008,4	2801,9	2,6455	6,1832
32,0	237,44	0,0012237	0,06243	1025,5	2801,8	2,6786	6,1577
34,0	240,88	0,0012310	0,05872	1041,8	2801,5	2,7101	6,1335
36,0	244,16	0,0012381	0,05540	1057,6	2801,0	2,7402	6,1103
38,0	247,31	0,0012451	0,05243	1072,8	2800,3	2,7690	6,0883
40,0	250,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	2,7967	6,0670
42,0	253,24	0,0012589	0,04729	1101,7	2798,4	2,8233	6,0465
44,0	256,05	0,0012657	0,04506	1115,5	2797,2	2,8489	6,0268
46,0	258,76	0,0012725	0,04302	1128,9	2795,9	2,8737	6,0077
48,0	261,38	0,0012792	0,04114	1141,9	2794,4	2,8976	5,9891
50,0	263,92	0,0012858	0,03941	1154,6	2792,8	2,9209	5,9712
55,0	269,94	0,0013023	0,03561	1185,1	2788,4	2,9761	5,9282
60,0	275,56	0,0013187	0,03241	1213,9	2783,3	3,0277	5,8878
65,0	280,83	0,0013350	0,02969	1241,4	2777,6	3,0764	5,8494
70,0	285,80	0,0013514	0,02734	1267,7	2771,4	3,1225	5,8126
75,0	290,51	0,0013678	0,02530	1293,0	2764,7	3,1663	5,7773
80,0	294,98	0,0013843	0,02349	1317,5	2757,5	3,2083	5,7430
85,0	299,24	0,0014010	0,02189	1341,2	2749,9	3,2487	5,7098
90,0	303,31	0,0014179	0,02046	1364,2	2741,8	3,2875	5,6773
95,0	307,22	0,0014351	0,01917	1386,7	2733,4	3,3251	5,6456
100,0	310,96	0,0014526	0,01800	1408,6	2724,4	3,3616	5,6143
110,0	318,04	0,0014887	0,01597	1451,2	2705,4	3,4316	5,5531
120,0	324,64	0,0015267	0,01425	1492,6	2684,8	3,4986	5,4930
130,0	330,81	0,0015670	0,01277	1533,0	2662,4	3,5633	5,4333
140,0	336,63	0,0016104	0,01149	1572,8	2638,3	3,6262	5,3737
150,0	342,12	0,0016580	0,01035	1612,2	2611,6	3,6877	5,3122
160,0	347,32	0,0017101	0,009330	1651,5	2582,7	3,7486	5,2496
170,0	352,26	0,0017690	0,008401	1691,6	2550,8	3,8103	5,1841
180,0	356,96	0,0018380	0,007534	1733,4	2514,4	3,8739	5,1135
190,0	361,44	0,0019231	0,006700	1778,2	2470,1	3,9417	5,0321
200,0	365,71	0,002038	0,005873	1828,8	2413,8	4,0181	4,9338
210,0	369,79	0,002218	0,005006	1892,2	2340,2	4,1137	4,8106
221,0	374,06	0,002864	0,003461	2045,0	2147,6	4,3463	4,5048

Вода и перегретый водяной пар

t, °C	$p=0,04 \cdot 10^5$ Па				$p=0,08 \cdot 10^5$ Па				$p=0,10 \cdot 10^5$ Па			
	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	c_p , кДж/(кг·°C)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	c_p , кДж/(кг·°C)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	c_p , кДж/(кг·°C)
0	0,0010002	0,0381	0,000154	-	0,0010002	0,0	-0,0001	-	0,0010002	0,0	-0,0001	-
10	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010002	42,0	0,1510	-
20	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	83,9	0,2963	-
40	36,08	2574,8	8,5421	1,88	0,0010078	167,4	0,5721	-	0,0010078	167,4	0,5721	-
60	38,40	2612,4	8,6586	1,88	19,18	2611,7	8,3369	1,90	15,34	2611,3	8,2331	1,90
80	40,72	2650,2	8,7685	1,89	20,34	2649,6	8,4474	1,90	16,27	2649,3	8,3437	1,90
100	43,03	2688,0	8,8727	1,89	21,50	2687,5	8,5519	1,90	17,20	2687,2	8,4484	1,910
120	45,34	2726,0	8,9718	1,90	22,66	2725,6	8,6512	1,90	18,12	2725,4	8,5479	1,913
140	47,65	2764,1	9,0664	1,91	23,82	2763,8	8,7460	1,91	19,05	2763,6	8,6427	1,918
160	49,96	2802,4	9,1570	1,92	24,97	2802,1	8,8366	1,92	19,98	2802,0	8,7334	1,926
180	52,27	2840,9	9,2438	1,93	26,13	2840,7	8,9236	1,93	20,90	2840,6	8,8204	1,933
200	54,58	2879,6	9,3274	1,94	27,28	2879,4	9,0072	1,94	21,82	2879,3	8,9041	1,944
220	56,89	2918,5	9,4080	1,95	28,44	2918,3	9,0878	1,95	22,75	2918,3	8,9848	1,954
240	59,20	2957,6	9,4858	1,96	29,59	2957,5	9,1657	1,96	23,67	2957,4	9,0626	1,964
260	61,51	2997,0	9,5610	1,97	30,75	2996,9	9,2410	1,97	24,60	2996,8	9,1379	1,976
280	63,81	3036,6	9,6340	1,98	31,90	3036,5	9,3139	1,98	25,52	3036,5	9,2109	1,987
300	66,12	3076,5	9,7047	2,00	33,06	3076,4	9,3847	2,00	26,44	3076,3	9,2817	1,999
350	71,89	3177,2	9,8732	2,03	35,94	3177,1	9,5532	2,03	28,75	3177,0	9,4502	2,030
400	77,66	3279,5	10,031	2,06	38,83	3279,4	9,7111	2,06	31,06	3279,4	9,6081	2,062
450	83,43	3383,3	10,179	2,09	41,71	3383,3	9,8600	2,09	33,37	3383,4	9,7570	2,095
500	89,20	3488,9	10,321	2,13	44,60	3488,9	10,001	2,13	35,68	3488,9	9,8982	2,129
600	100,74	3705,2	10,584	2,19	50,37	3705,2	10,264	2,19	40,29	3705,2	10,161	2,198
650	106,51	3816,0	10,707	2,23	53,25	3816,0	10,388	2,23	42,60	3816,0	10,285	2,23
700	112,28	3928,6	10,826	2,27	56,14	3928,5	10,506	2,27	44,91	3928,5	10,404	2,268
750	118,05	4042,8	10,941		59,02	4042,8	10,621		47,22	4042,8	10,518	
800	123,82	4158,9	11,051		61,91	4158,9	10,732		49,53	4158,9	10,628	2,339

t, °C	p=0,12·10 ⁵ Па				p=0,14·10 ⁵ Па				p=0,16·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0010002	0,0	-0,0001	-	0,0010002	0,0	-0,0001	-	0,0010002	0,0	-0,0001	-
10	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010002	42,0	0,1510	-
20	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	83,9	0,2963	-
40	0,0010078	167,5	0,5721	-	0,0010078	167,5	0,5721	-	0,0010078	167,5	0,5721	-
60	12,775	2611,0	8,1480	1,91	10,944	2610,6	8,0760	1,91	9,571	2610,2	8,0134	1,93
80	13,552	2649,0	8,2589	1,90	11,611	2648,7	8,1872	1,91	10,156	2648,4	8,1248	1,91
100	14,326	2687,1	8,3638	1,90	12,276	2686,8	8,2922	1,91	10,739	2686,6	8,2300	1,91
120	15,100	2725,2	8,4634	1,91	12,940	2725,0	8,3919	1,91	11,320	2724,8	8,3298	1,91
140	15,872	2763,5	8,5583	1,92	13,602	2763,3	8,4868	1,92	11,900	2763,1	8,4249	1,92
160	16,644	2801,9	8,6490	1,92	14,264	2801,8	8,5777	1,92	12,479	2801,6	8,5158	1,92
180	17,42	2840,5	8,7361	1,93	14,925	2840,3	8,6648	1,93	13,058	2840,2	8,6029	1,93
200	18,19	2879,2	8,8198	1,94	15,586	2879,1	8,7485	1,94	13,637	2879,0	8,6867	1,94
220	18,96	2918,2	8,9005	1,95	16,247	2918,1	8,8292	1,95	14,215	2918,0	8,7674	1,95
240	19,73	2957,4	8,9784	1,96	16,91	2957,3	8,9071	1,96	14,793	2957,2	8,8453	1,96
260	20,50	2996,8	9,0537	1,97	17,57	2996,7	8,9825	1,97	15,371	2996,6	8,9207	1,97
280	21,27	3036,4	9,1267	1,98	18,23	3036,3	9,0554	1,98	15,948	3036,2	8,9937	1,98
300	22,04	3076,3	9,1975	2,00	18,89	3076,2	9,1263	2,00	16,52	3076,1	9,0645	2,00
350	23,96	3177,0	9,3660	2,03	20,54	3177,0	9,2948	2,03	17,97	3176,9	9,2331	2,03
400	25,88	3279,3	9,5239	2,06	22,19	3279,3	9,4527	2,06	19,41	3279,2	9,3910	2,06
450	27,81	3383,3	9,6728	2,09	23,83	3383,2	9,6016	2,09	20,86	3383,2	9,5400	2,09
500	29,73	3488,9	9,8140	2,13	25,48	3488,9	9,7429	2,13	22,30	3488,8	9,6812	2,13
600	33,58	3705,2	10,077	2,19	28,78	3705,2	10,006	2,19	25,18	3705,2	9,9443	2,19
650	35,50	3816,0	10,200	2,23	30,43	3816,0	10,129	2,23	26,63	3816,0	10,068	2,23
700	37,42	3928,5	10,319	2,27	32,08	3928,5	10,248	2,27	28,07	3928,5	10,186	2,27
750	39,35	4042,8	10,434		33,73	4042,8	10,362		29,51	4042,8	10,301	
800	41,27	4158,9	10,544		35,38	4158,9	10,473		30,95	4158,9	10,412	

t, °C	p=0,20·10 ⁵ Па				p=0,30·10 ⁵ Па				p=1·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0010002	0,0	-0,0001	-	0,0010002	0,0	-0,0001	-	0,0010002	0,0	-0,000146	-
10	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010002	42,0	0,1510	-	0,0010003	42,1	0,1510	-
20	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	83,9	0,2963	-	0,0010017	84,0	0,2963	-
40	0,0010078	167,5	0,5721	-	0,0010078	167,5	0,5721	-	0,0010078	167,5	0,5721	-
60	0,0010171	251,1	0,8310	-	0,0010171	251,1	0,8310	-	0,0010171	251,2	0,8309	-
80	8,119	2647,8	8,0205	1,93	5,402	2646,3	7,8301	1,95	0,0010292	335,0	1,0752	-
100	8,586	2686,1	8,1261	1,92	5,716	2684,9	7,9365	1,93	1,696	2676,5	7,3628	2,038
120	9,052	2724,4	8,2261	1,92	6,027	2723,5	8,0371	1,93	1,793	2716,8	7,4681	2,007
140	9,516	2762,8	8,3213	1,92	6,338	2762,1	8,1328	1,93	1,889	2756,6	7,5669	1,984
160	9,980	2801,3	8,4124	1,93	6,649	2800,7	8,2241	1,93	1,984	2796,2	7,6605	1,977
180	10,444	2840,0	8,4996	1,93	6,958	2839,4	8,3116	1,93	2,078	2835,7	7,7496	1,974
200	10,907	2878,8	8,5834	1,94	7,268	2878,4	8,3956	1,95	2,172	2875,2	7,8348	1,975
220	11,370	2917,8	8,6642	1,96	7,577	2917,4	8,4765	1,96	2,266	2914,7	7,9166	1,979
240	11,832	2957,0	8,7422	1,96	7,885	2956,7	8,5545	1,96	2,359	2954,3	7,9954	1,985
260	12,295	2996,5	8,8176	1,98	8,194	2996,2	8,6300	1,98	2,453	2994,1	8,0714	1,993
280	12,757	3036,1	8,8906	1,98	8,502	3035,9	8,7031	1,99	2,546	3034,0	8,1449	2,001
300	13,219	3076,0	8,9614	2,00	8,811	3075,8	8,7740	2,00	2,639	3074,1	8,2162	2,010
350	14,374	3176,8	9,1300	2,03	9,581	3176,6	8,9426	2,03	2,871	3175,3	8,3854	2,038
400	15,529	3279,2	9,2880	2,06	10,351	3279,0	9,1007	2,06	3,103	3278,0	8,5439	2,068
450	16,68	3383,1	9,4369	2,09	11,121	3383,0	9,2497	2,10	3,334	3382,2	8,6932	2,099
500	17,84	3488,8	9,5781	2,13	11,891	3488,6	9,3909	2,13	3,565	3487,9	8,8346	2,132
600	20,15	3705,1	9,8413	2,19	13,43	3705,1	9,6541	2,19	4,028	3704,5	9,0979	2,200
650	21,30	3815,9	9,9646	2,23	14,20	3815,9	9,7774	2,23	4,259	3815,4	9,2214	2,23
700	22,45	3928,5	10,083	2,27	14,97	3928,4	9,8961	2,27	4,490	3928,0	9,3402	2,270
750	23,61	4042,8	10,198		15,74	4042,7	10,011		4,721	4042,3	9,4547	
800	24,76	4158,8	10,309		16,51	4158,8	10,121		4,952	4158,5	9,5656	2,341

t, °C	p=1,2·10 ⁵ Па				p=6,0·10 ⁵ Па				p=8,0·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0010002	0,1	-0,0001	-	0,0009999	0,6	-0,0001	-	0,0009998	0,8	-0,0001	-
10	0,0010002	42,1	0,1510	-	0,0010000	42,6	0,1509	-	0,0009999	42,8	0,1509	-
20	0,0010017	84,0	0,2963	-	0,0010014	84,4	0,2962	-	0,0010014	84,6	0,2961	-
40	0,0010078	167,6	0,5721	-	0,0010075	168,0	0,5719	-	0,0010075	168,2	0,5718	-
60	0,0010171	251,2	0,8309	-	0,0010169	251,6	0,8307	4,18	0,0010168	251,7	0,8306	4,18
80	0,0010292	335,0	1,0752	-	0,0010289	335,4	1,0749	4,19	0,0010288	335,5	1,0748	4,19
100	0,0010437	419,1	1,3069	-	0,0010434	419,4	1,3065	4,22	0,0010433	419,6	1,3063	4,22
120	1,491	2714,8	7,3799	2,06	0,0010604	504,0	1,5272	4,25	0,0010603	504,1	1,5270	4,25
140	1,571	2755,0	7,4797	2,01	0,0010799	589,3	1,7387	4,29	0,0010798	589,4	1,7385	4,29
160	1,651	2794,9	7,5740	1,98	0,3166	2759,2	6,7662	2,49	0,0011021	675,6	1,9422	4,34
180	1,730	2834,6	7,6636	1,97	0,3347	2805,6	6,8711	2,29	0,2471	2792,0	6,7144	2,48
200	1,808	2874,2	7,7491	1,97	0,3521	2850,2	6,9674	2,17	0,2608	2839,2	6,8164	2,28
220	1,887	2913,8	7,8312	1,98	0,3690	2893,6	7,0571	2,12	0,2740	2884,5	6,9101	2,18/
240	1,965	2953,6	7,9102	1,98	0,3857	2936,1	7,1418	2,09	0,2869	2928,4	6,9975	2,14
260	2,042	2993,4	7,9864	1,99	0,4021	2978,2	7,2222	2,07	0,2995	2971,6	7,0800	2,11
280	2,120	3033,4	8,0600	2,00	0,4183	3020,0	7,2992	2,06	0,3119	3014,2	7,1586	2,10
300	2,198	3073,6	8,1314	2,01	0,4344	3061,7	7,3731	2,06	0,3241	3056,5	7,2337	2,09
350	2,392	3174,9	8,3008	2,04	0,4742	3165,6	7,5470	2,07	0,3544	3161,7	7,4096	2,09
400	2,585	3277,6	8,4594	2,07	0,5137	3270,3	7,7086	2,10	0,3842	3267,2	7,5724	2,11
450	2,778	3381,9	8,6087	2,10	0,5529	3375,8	7,8598	2,12	0,4138	3373,3	7,7244	2,13
500	2,971	3487,7	8,7502	2,13	0,5919	3482,6	8,0026	2,14	0,4432	3480,5	7,8677	2,15
600	3,356	3704,4	9,0137	2,19	0,6697	3700,6	8,2676	2,21	0,5018	3699,0	8,1335	2,21
650	3,549	3815,2	9,1371	2,23	0,7084	3811,9	8,3916	2,24	0,5309	3810,5	8,2577	2,24
700	3,741	3927,8	9,2559	2,27	0,7472	3924,9	8,5108	2,27	0,5600	3923,7	8,3770	2,28
750	3,934	4042,2	9,3705	2,30	0,7859	4039,6	8,6258	2,31	0,5891	4038,5	8,4922	2,31
800	4,126	4158,4	9,4814	2,34	0,8245	4156,1	8,7369	2,34	0,6181	4155,1	8,6034	2,34

t, °C	ρ=10,0·10 ⁵ Па				ρ=12,0·10 ⁵ Па				ρ=14,0·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0009997	1,0	-0,0001		0,0009996	1,2	-0,0000	-	0,0009995	1,4	0,0000	-
10	0,0009998	43,0	0,1509		0,0009997	43,2	0,1509	-	0,0009996	43,4	0,1509	-
20	0,0010013	84,8	0,2961		0,0010012	85,0	0,2960	-	0,0010011	85,2	0,2960	-
40	0,0010074	168,3	0,5717		0,0010073	168,5	0,5716	-	0,0010072	168,7	0,5716	-
60	0,0010167	251,9	0,8305	4,18	0,0010166	252,1	0,8304	4,18	0,0010165	252,2	0,8302	4,18
80	0,0010287	335,7	1,0746	4,19	0,0010286	335,8	1,0745	4,19	0,0010285	336,0	1,0744	4,19
100	0,0010432	419,7	1,3062	4,214	0,0010431	419,9	1,3060	4,22	0,0010430	420,0	1,3058	4,22
120	0,0010602	504,3	1,5269	4,243	0,0010600	504,4	1,5267	4,25	0,0010599	504,6	1,5265	4,24
140	0,0010796	589,5	1,7383	4,283	0,0010795	589,6	1,7381	4,29	0,0010794	589,8	1,7379	4,29
160	0,0011019	675,7	1,9420	4,337	0,0011018	675,8	1,9418	4,34	0,0011016	675,9	1,9415	4,34
180	0,1944	2777,3	6,5854	2,613	0,0011274	763,2	2,1390	4,41	0,0011272	763,3	2,1387	4,41
200	0,2059	2827,5	6,6940	2,433	0,1692	2815,2	6,5891	2,60	0,1429	2802,1	6,4957	2,80
220	0,2169	2874,9	6,7921	2,316	0,1788	2865,0	6,6922	2,37	0,1515	2854,5	6,6044	2,48
240	0,2275	2920,5	6,8826	2,242	0,1879	2912,2	6,7861	2,26	0,1596	2903,7	6,7020	2,34
260	0,2378	2964,8	6,9674	2,194	0,1968	2957,8	6,8732	2,20	0,1674	2950,6	6,7917	2,26
280	0,2480	3008,3	7,0475	2,163	0,2054	3002,3	6,9551	2,17	0,1749	2996,1	6,8755	2,22
300	0,2580	3051,3	7,1239	2,141	0,2138	3046,0	7,0328	2,16	0,1823	3040,7	6,9546	2,20
350	0,2825	3157,7	7,3018	2,125	0,2345	3153,7	7,2129	2,13	0,2002	3149,6	7,1369	2,15
400	0,3066	3264,0	7,4606	2,126	0,2548	3260,9	7,3784	2,13	0,2178	3257,7	7,3038	2,15
450	0,3304	3370,7	7,6188	2,141	0,2748	3368,1	7,5320	2,15	0,2350	3365,5	7,4582	2,16
500	0,3540	3478,3	7,7627	2,164	0,2946	3476,1	7,6765	2,17	0,2521	3474,0	7,6032	2,18
600	0,4010	3697,4	8,0292	2,219	0,3339	3695,8	7,9436	2,23	0,2859	3694,3	7,8711	2,23
650	0,4244	3809,1	8,1535	2,25	0,3534	3807,7	8,0682	2,25	0,3027	3806,3	7,9959	2,26
700	0,4478	3922,4	8,2731	2,283	0,3729	3921,2	8,1880	2,29	0,3194	3920,0	8,1158	2,29
750	0,4711	4037,5	8,3883	2,32	0,3924	4036,4	8,3034	2,32	0,3361	4035,3	8,2314	2,32
800	0,4943	4154,2	8,4997	2,352	0,4118	4153,2	8,4149	2,35	0,3528	4152,3	8,3430	2,35

t, °C	p=16,0·10 ⁵ Па				p=18,0·10 ⁵ Па				p=20,0·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0009994	1,5	0,0000	-	0,0009993	1,8	0,0000	-	0,0009992	2,0	0,0000	-
10	0,0009995	43,6	0,1508	-	0,0009994	43,7	0,1508	-	0,0009993	43,9	0,1508	-
20	0,0010010	85,4	0,2960	-	0,0010009	85,6	0,2959	-	0,0010008	85,7	0,2959	-
40	0,0010071	168,9	0,5715	-	0,0010070	169,0	0,5714	-	0,0010069	169,2	0,5713	-
60	0,0010164	252,4	0,8301	4,18	0,0010163	252,6	0,8300	4,18	0,0010162	252,7	0,8299	4,18
80	0,0010284	336,1	1,0742	4,19	0,0010283	336,3	1,0741	4,19	0,0010282	336,5	1,0740	4,19
100	0,0010429	420,2	1,3057	4,21	0,0010428	420,3	1,3055	4,21	0,0010427	420,5	1,3054	4,211
120	0,0010598	504,7	1,5263	4,24	0,0010597	504,8	1,5261	4,24	0,0010596	505,0	1,5260	4,240
140	0,0010792	589,9	1,7377	4,28	0,0010791	590,0	1,7375	4,28	0,0010790	590,2	1,7373	4,280
160	0,0011015	676,0	1,9413	4,34	0,0011013	676,2	1,9411	4,34	0,0011012	676,3	1,9408	4,334
180	0,0011270	763,4	2,1385	4,40	0,0011268	763,5	2,1382	4,40	0,0011266	763,6	2,1379	4,403
200	0,0011564	852,4	2,3306	4,49	0,0011562	852,5	2,3303	4,49	0,0011560	852,6	2,3300	4,494
220	0,1310	2743,7	6,5252	2,61	0,1150	2832,3	6,4524	2,79	0,1021	2820,4	6,3842	2,939
240	0,1383	2894,9	6,6269	2,44	0,1218	2885,8	6,5586	2,54	0,1084	2876,3	6,4953	2,674
260	0,1453	2943,3	6,7196	2,34	0,1281	2935,7	6,6541	2,40	0,1144	2927,9	6,5941	2,505
280	0,1521	2989,8	6,8052	2,28	0,1343	2983,4	6,7420	2,34	0,1200	2976,9	6,6842	2,395
300	0,1586	3035,2	6,8858	2,24	0,1402	3029,6	6,8240	2,28	0,1255	3024,0	6,7679	2,321
350	0,1746	3145,5	7,0704	2,18	0,1546	3141,4	7,0111	2,20	0,1386	3137,2	6,9574	2,235
400	0,1900	3254,5	7,2386	2,17	0,1684	3251,3	7,1807	2,19	0,1512	3248,1	7,1285	2,197
450	0,2052	3362,9	7,3939	2,18	0,1820	3360,3	7,3369	2,19	0,1635	3357,7	7,2855	2,191
500	0,2202	3471,8	7,5395	2,19	0,1954	3469,6	7,4830	2,20	0,1756	3467,4	7,4323	2,201
600	0,2499	3692,7	7,8081	2,23	0,2219	3691,1	7,7524	2,24	0,1995	3689,5	7,7024	2,240
650	0,2646	3804,9	7,9332	2,26	0,2351	3803,5	7,8776	2,26	0,2114	3802,1	7,8278	2,227
700	0,2793	3918,7	8,0532	2,29	0,2481	3917,5	7,9979	2,29	0,2232	3916,3	7,9483	2,299
750	0,2940	4034,2	8,1689	2,32	0,2612	4033,1	8,1137	2,32	0,2350	4032,0	8,0643	2,33
800	0,3086	4151,3	8,2807	2,36	0,2742	4150,4	8,2256	2,36	0,2467	4149,4	8,1763	2,364

t, °C	p=30,0·10 ⁵ Па				p=80,0·10 ⁵ Па				p=90,0·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0009994	1,5	0,0000	-	0,0009993	1,8	0,0000	-	0,0009992	2,0	0,0000	-
10	0,0009988	44,9	0,1507	-	0,0009965	49,8	0,1503	-	0,0009960	50,7	0,1502	-
20	0,0010004	86,7	0,2957	-	0,0009981	91,4	0,2946	-	0,0009977	92,3	0,2944	-
40	0,0010065	170,1	0,5709	-	0,0010043	174,5	0,5690	-	0,0010038	175,4	0,5686	-
60	0,0010158	253,6	0,8294	4,18	0,0010135	257,8	0,8267	4,17	0,0010131	258,6	0,8262	4,16
80	0,0010278	337,3	1,0733	4,19	0,0010254	341,2	1,0700	4,18	0,0010249	342,0	1,0694	4,18
100	0,0010422	421,2	1,3046	4,209	0,0010396	425,0	1,3007	4,198	0,0010391	425,8	1,3000	4,196
120	0,0010590	505,7	1,5250	4,238	0,0010562	509,2	1,5206	4,226	0,0010556	509,9	1,5197	4,223
140	0,0010783	590,8	1,7362	4,277	0,0010752	594,1	1,7311	4,263	0,0010745	594,7	1,7301	4,261
160	0,0011005	676,9	1,9396	4,330	0,0010968	679,8	1,9338	4,313	0,0010961	680,4	1,9326	4,310
180	0,0011258	764,1	2,1366	4,399	0,0011216	766,7	2,1299	4,378	0,0011207	767,2	2,1286	4,374
200	0,0011550	853,0	2,3284	4,489	0,0011500	855,1	2,3207	4,461	0,0011490	855,5	2,3191	4,456
220	0,0011891	943,9	2,5166	4,609	0,0011829	945,3	2,5075	4,571	0,0011817	945,6	2,5057	4,564
240	0,06818	2823,0	6,2245	3,336	0,0012218	1038,2	2,6920	4,720	0,0012202	1038,3	2,6899	4,710
260	0,07286	2885,5	6,3440	2,944	0,0012687	1134,6	2,8762	4,932	0,0012667	1134,4	2,8737	4,917
280	0,07714	2941,8	6,4477	2,704	0,0013277	1236,2	3,0633	5,25	0,0013249	1235,6	3,0600	5,23
300	0,08116	2994,2	6,5408	2,548	0,02425	2785,4	5,7918	5,31	0,0014022	1344,9	3,2539	5,75
350	0,09053	3115,7	6,7443	2,360	0,02995	2988,3	6,1324	3,350	0,02579	2957,5	6,0383	3,662
400	0,09933	3231,6	6,9231	2,273	0,03431	3140,1	6,3670	2,789	0,02993	3119,7	6,2891	2,926
450	0,1078	3344,4	7,0847	2,244	0,03815	3273,1	6,5577	2,565	0,03348	3257,9	6,4872	2,643
500	0,1161	3478,8	7,2633	2,240	0,04172	3398,5	6,7254	2,464	0,03675	3386,4	6,6592	2,515
600	0,1324	3681,5	7,5084	2,263	0,04841	3640,7	7,0201	2,389	0,04281	3632,4	6,9585	2,417
650	0,1404	3795,1	7,6349	2,29	0,05162	3759,8	7,1528	2,39	0,04571	3752,6	7,0924	2,42
700	0,1483	3910,1	7,7562	2,314	0,05478	3879,1	7,2787	2,396	0,04854	3872,9	7,2193	2,42
750	0,1563	4026,6	7,8729	2,34	0,05790	3999,4	7,3992	2,41	0,05134	3994,0	7,3406	2,42
800	0,1641	4144,6	7,9856	2,376	0,06098	4120,9	7,5151	2,440	0,05410	4116,1	7,4572	2,452

t, °C	p=100·10 ⁵ Па				p=120·10 ⁵ Па				p=140·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0009953	10,1	0,0005	-	0,0009943	12,1	0,0006	-	0,0009933	14,1	0,0007	-
10	0,0009956	51,7	0,1500	-	0,0009947	53,6	0,1498	-	0,0009938	55,6	0,1496	-
20	0,0009972	93,2	0,2942	-	0,0009964	95,1	0,2937	-	0,0009955	97,0	0,2933	-
40	0,0010034	176,3	0,5682	-	0,0010026	178,1	0,5674	-	0,0010017	179,8	0,5666	-
60	0,0010126	259,4	0,8257	4,16	0,0010118	261,1	0,8246	4,16	0,0010109	262,8	0,8236	4,16
80	0,0010244	342,8	1,0687	4,17	0,0010235	344,4	1,0674	4,17	0,0010226	346,0	1,0661	4,16
100	0,0010386	426,5	1,2992	4,194	0,0010376	428,0	1,2977	4,189	0,0010366	429,5	1,2961	4,185
120	0,0010551	510,6	1,5188	4,221	0,0010540	512,0	1,5170	4,216	0,0010529	513,5	1,5153	4,212
140	0,0010739	595,4	1,7291	4,258	0,0010727	596,7	1,7271	4,252	0,0010715	598,0	1,7251	4,247
160	0,0010954	681,0	1,9315	4,307	0,0010940	682,2	1,9292	4,300	0,0010926	683,4	1,9269	4,294
180	0,0011199	767,8	2,1272	4,370	0,0011183	768,8	2,1246	4,361	0,0011167	769,9	2,1220	4,354
200	0,0011480	855,9	2,3176	4,450	0,0011461	856,8	2,3146	4,440	0,0011442	857,7	2,3117	4,430
220	0,0011805	946,0	2,5040	4,557	0,0011782	946,6	2,5005	4,542	0,0011759	947,2	2,4970	4,530
240	0,0012188	1038,4	2,6878	4,700	0,0012158	1038,8	2,6837	4,680	0,0012129	1039,1	2,6796	4,662
260	0,0012648	1134,3	2,8711	4,902	0,0012609	1134,2	2,8661	4,872	0,0012572	1134,1	2,8612	4,846
280	0,0013221	1235,2	3,0567	5,20	0,0013167	1234,3	3,0503	5,16	0,0013115	1233,5	3,0441	5,11
300	0,0013978	1343,7	3,2494	5,70	0,0013895	1341,5	3,2407	5,62	0,0013816	1339,5	3,2324	5,53
350	0,02242	2924,2	5,9464	4,516	0,01721	2848,4	5,7615	5,12	0,01323	2753,5	5,5606	7,07
400	0,02641	3098,5	6,2158	3,246	0,02108	3053,3	6,0787	3,435	0,01722	3004,0	5,9488	3,885
450	0,02974	3242,2	6,4220	2,815	0,02411	3209,9	6,3032	2,909	0,02007	3175,8	6,1953	3,119
500	0,03277	3374,1	6,5984	2,625	0,03679	3349,0	6,4893	2,683	0,02251	3323,0	6,3922	2,808
600	0,03833	3624,0	6,9025	2,474	0,03161	3607,0	6,8034	2,504	0,02681	3589,8	6,7172	2,566
650	0,04097	3745,4	7,0378	2,44	0,03387	3731,0	6,9416	2,49	0,02880	3716,5	6,8582	2,54
700	0,04356	3866,6	7,1656	2,44	0,03607	3854,1	7,0714	2,464	0,03073	3841,5	6,9901	2,500
750	0,04610	3988,5	7,2878	2,44	0,03823	3977,6	7,1952	2,46	0,03261	3966,6	7,1155	2,49
800	0,04860	4111,3	7,4050	2,478	0,04035	4101,8	7,3137	2,491	0,03446	4092,2	7,2353	2,518

t, °C	p=160·10 ⁵ Па				p=240·10 ⁵ Па				p=300·10 ⁵ Па			
	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)	v, м ³ /кг	h, кДж/кг	s, кДж/(кг·К)	c _p , кДж/(кг·°C)
0	0,0009924	16,1	0,0008	-	0,0009885	24,1	0,0009	-	0,0009857	30,0	0,0008	-
10	0,0009928	57,5	0,1494	-	0,0009892	65,1	0,1484	-	0,0009866	70,8	0,1475	-
20	0,0009946	98,8	0,2928	-	0,0009912	106,2	0,2910	-	0,0009886	111,7	0,2895	-
40	0,0010008	181,6	0,5659	-	0,0009975	188,6	0,5627	-	0,0009950	193,8	0,5604	-
60	0,0010100	264,5	0,8225	4,15	0,0010066	271,1	0,8184	4,14	0,0010041	276,1	0,8153	4,13
80	0,0010217	347,6	1,0648	4,16	0,0010181	354,0	1,0598	4,14	0,0010155	358,7	1,0560	4,14
100	0,0010356	431,0	1,2946	4,181	0,0010318	437,1	1,2887	4,165	0,0010289	441,6	1,2843	4,153
120	0,0010518	514,9	1,5136	4,207	0,0010476	520,6	1,5067	4,189	0,0010445	524,9	1,5017	4,177
140	0,0010703	599,4	1,7231	4,242	0,0010656	604,7	1,7154	4,222	0,0010621	608,7	1,7097	4,208
160	0,0010912	684,6	1,9247	4,288	0,0010859	689,5	1,9159	4,264	0,0010821	693,3	1,9095	4,247
180	0,0011151	771,0	2,1195	4,346	0,0011090	775,3	2,1095	4,317	0,0011046	778,7	2,1022	4,296
200	0,0011423	858,6	2,3087	4,420	0,0011352	862,3	2,2973	4,384	0,0011300	865,2	2,2891	4,358
220	0,0011736	947,9	2,4936	4,517	0,0011651	950,8	2,4805	4,469	0,0011590	953,1	2,4711	4,437
240	0,0012101	1039,5	2,6756	4,645	0,0011996	1041,2	2,6603	4,580	0,0011922	1042,8	2,6493	4,537
260	0,0012535	1134,0	2,8563	4,820	0,0012400	1134,2	2,8380	4,728	0,0012307	1134,8	2,8252	4,669
280	0,0013065	1232,8	3,0381	5,07	0,0012883	1230,7	3,0157	4,931	0,0012762	1229,9	3,0002	4,845
300	0,0013742	1337,7	3,2245	5,46	0,0013482	1332,1	3,1956	5,23	0,0013315	1329,0	3,1763	5,09
350	0,009782	2618,5	5,3071	12,24	0,001611	1630,1	3,6929	7,17	0,001554	1611,3	3,6475	6,45
400	0,01427	2949,7	5,8215	4,465	0,006738	2642,0	5,2439	10,76	0,002806	2159,1	4,4854	25,71
450	0,01702	3140,0	6,0947	3,360	0,009766	2975,5	5,7242	4,772	0,006730	2823,1	5,4458	6,62
500	0,01929	3296,3	6,3038	2,945	0,01174	3180,5	5,9987	3,628	0,008679	3083,9	5,7954	4,316
600	0,02321	3572,4	6,6401	2,631	0,01480	3500,5	6,3888	2,920	0,01144	3444,2	6,2351	3,165
650	0,02500	3701,8	6,7842	2,58	0,01613	3642,0	6,5464	2,78	0,01258	3596,0	6,4042	2,98
700	0,02672	3828,9	6,9183	2,537	0,01738	3777,9	6,6898	2,692	0,01365	3739,2	6,5553	2,819
750	0,02840	3955,7	7,0453	2,52	0,01858	3911,7	6,8238	2,62	0,01466	3878,6	6,6949	2,74
800	0,03004	4082,7	7,1665	2,544	0,01974	4044,5	6,9506	2,652	0,01562	4016,0	6,8260	2,736

С о д е р ж а н и е

Введение.....	3
ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
Реальный газ.....	4
Равновесие термодинамических систем.....	10
Фазовые переходы.....	18
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	43
Лабораторная работа № 1	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.....	43
Лабораторная работа № 2	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ ВОДЫ В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ НА КРИВОЙ ПАРООБРАЗОВАНИЯ.....	49
Лабораторная работа № 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ “ПАР - ЖИДКОСТЬ” ВОДЫ.....	57
Лабораторная работа № 4	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ И СТЕПЕНИ СУХОСТИ ВЛАЖНОГО ПАРА ВОДЫ.....	67
Лабораторная работа № 5	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ВОДЫ.....	76
Лабораторная работа № 6	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ.....	82
Л и т е р а т у р а.....	87
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	88

Учебное издание

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Техническая термодинамика»
для студентов теплоэнергетических специальностей

В 4-х частях

Часть 2

РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Составители: РОМАНЮК Владимир Никанорович
ТОМКУНАС Елена Валерьевна
БАУК Ирина Владимировна
ТАРАСЕВИЧ Леонид Владимирович

Редактор Г.В.Ширкина. Корректор М.П.Антонова
Компьютерная верстка Л.М.Чернышевич

Подписано в печать 01.11.2002.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л.6,2. Уч.-изд. л.4,7. Тираж 110. Заказ 314.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.