

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИЗОХОРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
ДЛЯ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Утверждено редакционно-издательским
советом института в качестве методи-
ческих указаний к лабораторной работе
для студентов

УДК 621.036.7 (076.5)

В методических указаниях приведены теоретические основы исследования процесса изохорического нагревания воды и водяного пара, а также методы лабораторного исследования этого процесса.

Лабораторная работа предназначена для студентов I, 2 и 3-го факультетов КуАИ, изучающих курс "Техническая термодинамика".

Составители: А.Д.К л е н и н а, А.П.Т о л с т о н о в

Рецензент А.А.Ж и р н о в

Ц е л ь р а б о т ы: ознакомление со свойствами воды и водяного пара при высокой температуре и давлении.

З а д а ч а: экспериментально определить зависимость между давлением и температурой для воды и водяного пара, нагреваемых (или охлаждаемых) при постоянном объеме; построить изоchoры, соответствующие различным удельным объемам (меньше и больше критического); вычислить удельную теплоту парообразования при фазовом переходе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для идеального газа справедливо уравнение состояния, имеющее вид

$$pV = m \frac{R_M}{M} T, \quad (1)$$

где p - давление, Па (Н/м^2); V - объем, занимаемый газом, м^3 ; m - масса газа, кг; R_M - универсальная газовая постоянная, одинаковая для килограмм-моля любого газа и равная $8314,3$ Дж/кмоль·К; M - масса килограмм-моля газа, кг/кмоль; T - термодинамическая температура газа, К.

Если обозначить через $R = \frac{R_M}{M}$ удельную газовую постоянную, то уравнение (1) для 1 кг газа можно записать как

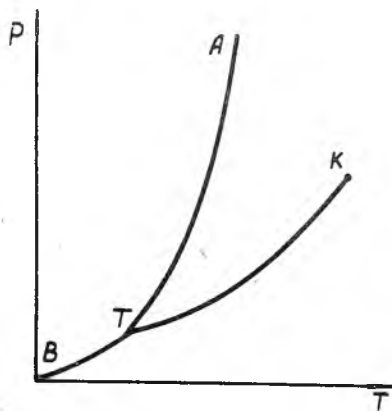
$$p v = RT, \quad (2)$$

где $v = \frac{V}{m}$ - удельный объем газа, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Уравнение (1) получено в предположении, что между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия и объем, занимаемый молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом газа. Для описания поведения реальных газов это уравнение применимо лишь в частном случае, когда параметры газов находятся вдали от области конденсации. В общем случае уравнение (1) неправильно отражает свойства реальных веществ не только в количественном, но и качественном отношении.

Любое реальное вещество в зависимости от его параметров (например температуры и давления) может находиться в виде газовой, жидкой или твердой фазы. Процесс перехода из одной фазы в другую называется фазовым переходом. Существование таких переходов уравнением (1) не предсказывается.

На рис.1 изображена характерная ρ, T - диаграмма вещества с нанесенными на ней кривыми фазовых переходов.



Р и с. 1. Фазовая ρT -диаграмма

Линия BT представляет собой кривую сублимации (кристаллизации) вещества, т.е. зависимость $\rho = f(T_c)$ для перехода твердого тела в газообразное; линия TA - кривую плавления (кристаллизации), т.е. зависимость $\rho = f(T_{пл})$, а линия TK - кривую кипения (конденсации), т.е. зависимость $\rho = f(T_{нос})$. Кривая кипения обычно называется кривой (или линией) насыщения. Она оканчивается точкой K, называемой критической точкой. Эта точка является верхней границей двухфазной области, где возможно равновесное сосуществование жидкости и пара. Параметры вещества в этом состоянии называются критическими: критическое давление $\rho_{кр}$, критическая температура $T_{кр}$, критический удельный объем $\nu_{кр}$. Точка T - тройная точка, в которой вещество сосуществует в равновесном состоянии в трех фазах. Для воды тройная точка соответствует температуре $T = 273,16 K$ ($t = 0,01^\circ C$) и давлению $\rho = 0,0061$ бар. Фазовые переходы происходят постепенно, поэтому для реальных веществ существуют области, где вещество находится одновременно в двух фазах. Особенность всех фазовых переходов в том, что при постоянном давлении они протекают при неизменной температуре и для их осуществления необходимо подвести (отвести) извне некоторое количество теплоты, которое называется теплотой фазового перехода.

На рис.2 приведена характерная для реальных веществ ρ, ν -диаграмма, включающая область парообразования - фазового перехода вещества из жидкости в пар. Область фазового перехода ограничена нижней TK и верхней KE пограничными кривыми. Линия постоянной температуры - изотерма - представляет собой некоторую ломаную линию ABCD, имеющую прямолинейный участок BC, так как процесс парообразования (конденсации) при постоянном давлении происходит без изменения температуры.

Количество теплоты, необходимое для того, чтобы при изобарном процессе перевести 1 кг вещества из состояния кипящей жидкости (точ-

ка В) в состояние сухого насыщенного пара (точка С), называется удельной теплотой парообразования χ . В критической точке К теплота парообразования χ равняется нулю, а свойства обеих фаз становятся тождественными.

Для каждого из фазовых переходов справедливо уравнение Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{q_{\text{фаз.пер}}}{T \Delta v} \quad (3)$$

При фазовом переходе из жидкости в пар уравнение (3) принимает вид

$$\frac{d\rho_{\text{нас}}}{dT_{\text{нас}}} = \frac{\chi}{T(v'' - v')} \quad (4)$$

где $\rho_{\text{нас}}$ - равновесное давление и $T_{\text{нас}}$ - равновесная температура в точках фазового перехода;

χ - удельная теплота парообразования;

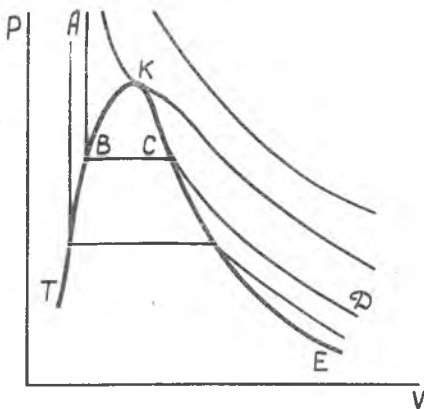
v'' - удельный объем пара на линии насыщения;

v' - удельный объем жидкости на линии насыщения.

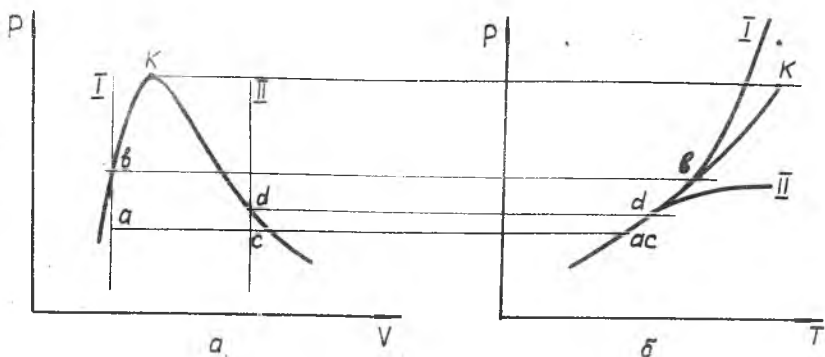
Поскольку плотность пара всегда меньше, чем плотность жидкости, т.е. $v'' > v'$, то из уравнения (4) следует, что для фазового перехода жидкости в пар всегда $\frac{d\rho_{\text{нас}}}{dT_{\text{нас}}} > 0$. т.е. с ростом температуры давление насыщения увеличивается. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса широко используется для определения термодинамических свойств веществ в области фазовых переходов.

При низких давлениях трудно экспериментально определить удельный объем сухого насыщенного пара v'' . Тогда, проводя исследование кривой насыщения, т.е. определив зависимость давления насыщения от температуры и измерив удельную теплоту парообразования χ , можно рассчитать величину $v'' - v'$ по уравнению (4). При высоких же давлениях затруднено точное измерение χ , и она может быть вычислена по результатам исследования кривой насыщения и удельных объемов.

Рассмотрим процесс (рис.3) изохорного нагревания вещества, причем начальное состояние процесса находится в двухфазной области. До тех пор, пока процесс протекает в двухфазной области (рис.3,а, участок а-в изохоры I, участок c-d изохоры II), давление вещества в каж-



Р и с. 2. Фазовая ρ, V -диаграмма



Р и с. 3. Различные случаи изохорного нагревания вещества

дой точке процесса равняется давлению насыщенного пара при соответствующей температуре (рис.3,б). Любой термодинамический процесс, протекающий в двухфазной области, в p, T -диаграмме изображается линией, совпадающей с кривой насыщения.

Если удельный объем вещества меньше критического (рис.3,а изохора I), то изохорное нагревание приводит к полной конденсации пара, в результате чего эта изохора пересекает левую пограничную кривую.

При дальнейшем нагревании вещество будет находиться в однофазном жидком состоянии, и зависимость между температурой и давлением принимает характерный для жидкости вид – резкий рост давления при незначительном изменении температуры (рис.3,б, кривая I). Если же удельный объем вещества больше критического (рис.3,а, изохора II), то изохора пересекает правую пограничную кривую, т.е. вещество переходит в состояние перегретого пара (газа), и зависимость между температурой и давлением принимает характерный для газа вид – резкий рост температуры при незначительном изменении давления.

Таким образом, в однофазной области изохоры для значений $v < v_{кр}$ располагаются в p, T -диаграмме выше и левее кривой насыщения (рис.3,б, кривая I), а для значений $v > v_{кр}$ – ниже и правее кривой насыщения.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для изучения изохорического процесса изменения состояния воды и водяного пара состоит из двух независимых частей (вследствие их идентичности на рис.4 показана одна из них).

Величины	Но м е р а з а м е р о в															
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$E_d, мВ$																
$t_{нас}, ^\circ C$																
$T_{нас}, К$																
$P_{нас}, мПа$																
$v^I, м^3/кг$																
$v^II, м^3/кг$																
$dP_{нас}/dT, \frac{Н}{м^2К}$																
$\gamma, кДж/кг$																
$\gamma_{табл.} кДж/кг$																
$\delta\gamma, \%$																

2. Включить электронагреватель сосуда в сеть 220 В, предварительно открыв кран подачи охлаждающей жидкости. Продолжительность нагрева до первого замера приблизительно 15–20 мин.

3. Измерить атмосферное давление p_H по барометру.

4. Записать показания образцового манометра $p_{гел}$ и потенциометра $E_{изм}$, а также температуру холодного спая термомпары $t_{кс} ^\circ C$.

5. При дальнейшем изменении давления и температуры запись показаний приборов вести непрерывно при изменении показаний потенциометра через 1 мВ.

При проведении опыта следовало бы снимать показания приборов при равновесном состоянии, когда для каждой опытной точки температура и давление в течение некоторого периода постоянны. Однако на это нужно длительное время, поэтому, ускоряя опыт, снимают значения давлений и температур непрерывно, допуская тем самым некоторую погрешность.

П р е д у п р е ж д е н и е

В зависимости от массы воды, содержащейся в сосуде, при ее нагреве может быть различным характер изменения температуры и давления (рис.3,6, кривая I и II). Предел изменения роста давления ограничен прочностью сосуда и по шкале образцового манометра определяется давлением $p = 130$ атм (80 делений). Предел изменения роста темпера-

туры определяется показанием потенциометра, равным 25 мВ, что для хромель-копелевой термопары соответствует 320°C.

5. Выключить электронагреватель. После остывания сосуда закрыть кран подачи охлаждающей жидкости.

6. Результаты измерений записать в протокол.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Давление насыщения в сосуде в мПа

$$p_{нас} = p_H + p_{изд}$$
,
где p_H - атмосферное давление, мПа; $p_{изд}$ - избыточное давление, рассчитанное по показаниям образцового манометра, мПа.

2. Термоздс холодного спая хромель-копелевой термопары находится с помощью градуировочной таблицы по показаниям $t_{кс}, ^\circ\text{C}$.

3. Температура насыщения $t_{нас}$ находится с помощью градуировочной таблицы хромель-копелевой термопары по значениям $E_{действ}$ в мВ, равной

$$E_d = E_{изм} + E_{кс}$$

4. Построить в p, T -координатах кривую насыщения для воды и водяного пара от начальной температуры 100°C до критической по результатам табл. I. На этом же графике следует отложить и соединить плавной линией опытные точки для обеих изохор.

5. Количество воды, налитой первоначально в сосуд, в кг

$$m = \frac{\rho V}{\rho}$$

где V - объем сосуда, м³; ρ - удельный объем воды для изохоры I или удельный объем сухого насыщенного водяного пара для изохоры II (рис. 3, б), м³/кг.

Значения удельных объемов воды ρ'' или сухого пара ρ' на линии насыщения находятся из табл. I по температуре вещества в однофазном состоянии.

6. Удельная теплота парообразования в кДж/кг для опытных точек фазового перехода

$$r = T_{нас} (\rho'' - \rho') \frac{d\rho_{нас}}{dT_{нас}},$$

где $\rho_{нас}$ - давление насыщения, $\frac{H}{H^2}$; $T_{нас}$ - температура насыщения, К; удельные объемы ρ'' и ρ' берутся из табл. I по температуре $t_{нас}, ^\circ\text{C}$, м³/кг; $\frac{d\rho_{нас}}{dT_{нас}}$ определяется графически, как тангенс угла наклона касательной к кривой насыщения, построенной в координатах $p-T$, в точке, для которой определяется теплота парообразования.

7. Сравнить рассчитанные значения теплоты парообразования с найденными из табл. I, вычислить относительную величину расхождений между ними:

$$\delta \tau = \frac{\tau_{расч} - \tau_{табл}}{\tau_{табл}} 100\%$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. Графики изохорических процессов и кривой насыщения в p, T - координатах.
3. Описание фазовых состояний воды и водяного пара при изохорическом процессе нагревания, когда $V < V_{кр}$ и $V > V_{кр}$ (рис.3).

Т а б л и ц а I

Сухой насыщенный пар и вода по кривой насыщения

$t, ^\circ C$	$p_n, \text{бар}$	$V', \text{м}^3/\text{кг}$	$V'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$\tau, \text{кДж}/\text{кг}$
0	0,006108	0,0010002	206,3	0,004847	2500,8
10	0,012271	0,0010004	106,42	0,009398	2477,3
20	0,02337	0,0010018	57,84	0,01729	2453,4
30	0,04241	0,0010044	32,93	0,03036	2430,0
40	0,07375	0,0010079	19,55	0,05115	2406,1
50	0,12335	0,0010121	12,05	0,08302	2382,3
60	0,1992	0,0010171	7,678	0,1302	2358,0
70	0,3116	0,0010228	5,0451	0,1982	2333,3
80	0,4736	0,0010290	3,409	0,2933	2308,2
90	0,7011	0,0010359	2,361	0,4235	2282,5
100	1,0132	0,0010435	1,673	0,5977	2256,7
110	1,4327	0,0010515	1,210	0,8263	2230,0
120	1,9854	0,0010603	0,8917	1,122	2202,7
130	2,7011	0,0010697	0,6683	1,496	2174,2
140	3,614	0,0010798	0,5087	1,966	2144,9
150	4,760	0,0010906	0,3926	2,547	2114,3
160	6,180	0,0011021	0,3068	3,259	2082,5
170	7,920	0,0011144	0,2426	4,122	2049,4
180	10,027	0,0011275	0,1939	5,157	2015,1

$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{бар}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$z, \text{кДж}/\text{кг}$
190	12,553	0,0011415	0,1564	6,395	1978,7
200	15,550	0,0011565	0,1272	7,863	1940,6
210	19,080	0,0011726	0,1044	9,578	1900,4
220	23,202	0,0011900	0,08606	11,62	1857,7
230	27,979	0,0012087	0,07147	13,99	1812,7
240	33,480	0,0012291	0,05967	16,76	1765,6
250	39,780	0,0012512	0,05005	19,98	1714,9
260	46,940	0,0012755	0,04215	23,72	1661,3
270	55,050	0,0013023	0,03560	28,09	1604,4
280	64,190	0,0013321	0,03013	33,19	1542,8
290	74,450	0,0013665	0,02553	39,17	1476,3
300	85,920	0,0014036	0,02164	46,21	1404,3
310	98,690	0,001447	0,01831	54,61	1325,1
320	112,800	0,001499	0,01545	64,74	1237,6
330	128,64	0,001562	0,01297	77,09	1139,6
340	146,08	0,001639	0,01078	92,77	1027,0
350	165,37	0,001741	0,008805	113,6	893,0
360	186,74	0,001894	0,006943	144,1	719,7
370	210,53	0,00222	0,00493	202,4	433,4
374	220,87	0,002800	0,00347	288,0	114,6
374,12*	221,15*	0,003147 *	0,003147	317,76	

* Параметры критической точки.

4. Выводы по работе.

Л и т е р а т у р а

1. В у к а л о в и ч М.П., Н о в и к о в И.И. Термодинамика: Учебное пособие для вузов. -М.:Машиностроение, 1972, с.193-197, с.222-283.
2. К и р и л л и н В.А., С ы ч е в В.В., Ш е й н д л и н А.Е. Техническая термодинамика. -М.:Энергия, 1968, с.125-128, с.159-161.
3. В у к а л о в и ч М.П., Р ы в к и н С.Л., А л е к с а н д р о в А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. -М.: Изд-во стандартов, 1969.

Составители: Алла Дмитриевна К л е н и н а,
Арлен Петрович Т о л с т о н о г о в

ИЗОХОРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Редактор Т.К.К р е т и ц и н а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор М.В.Н а в л о в а ,

Подписано в печать 14.12.84г. Формат 60x84 I/16.
Бумага оберточная белая. Оперативная печать.
Усл.п.л. 0,69. Уч.-изд.л. 0,6. Т.500 экз.
Заказ 707 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева, г.Куйбышев, ул.Моло-
догвардейская, 151.

Обл.тип. им.В.П.Мяги, г.Куйбышев, ул.Венцека, 60.