

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. А. Григорьев, Р. М. Мурдаев, Ю. Л. Расторгуев, Экспериментальное исследование  $P$ - $V$ - $T$ -зависимости воды, *TBT*, 1974, том 12, выпуск 1, 83–91

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 07:57:19



УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ *P-V-T*-ЗАВИСИМОСТИ ВОДЫ*В. А. Григорьев, Р. М. Мурдаев, Ю. Л. Расторгуев*

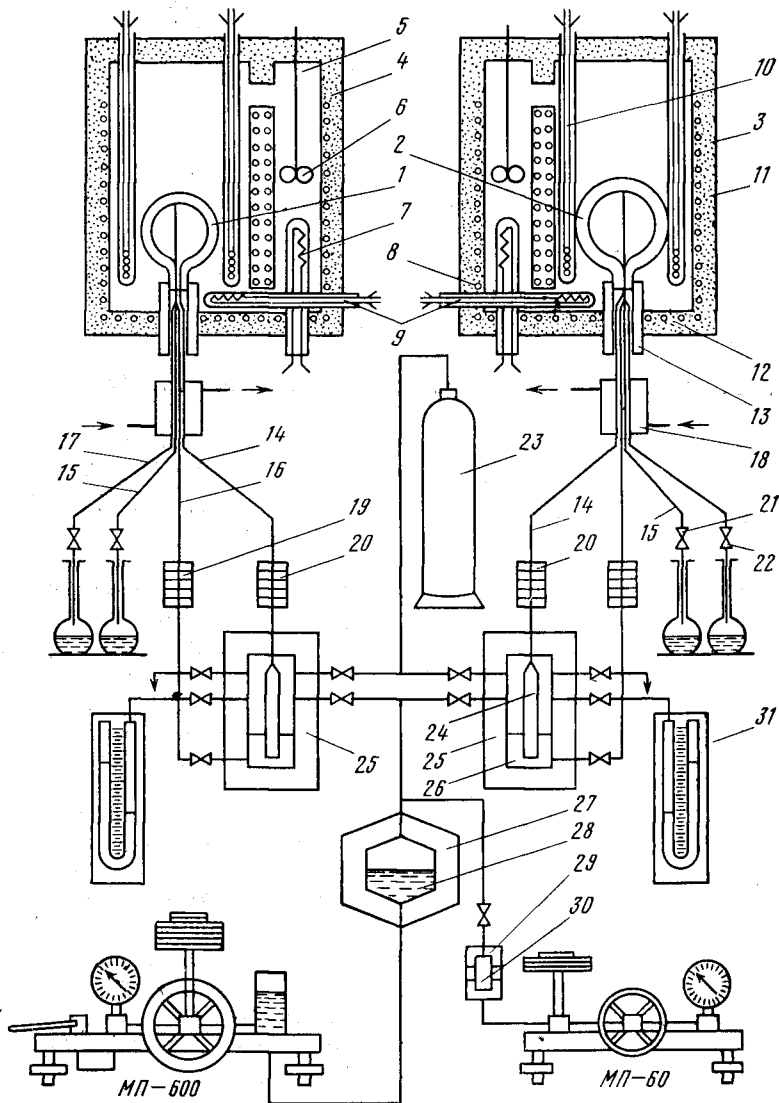
Приводятся результаты экспериментального исследования удельных объемов воды на 12 изотермах методом сферического неразгруженного пьезометра. Предложен метод внесения поправки на изотермическую деформацию пьезометра. Результаты эксперимента сравниваются с наиболее надежными данными других авторов.

В работе исследована *P-V-T*-зависимость воды на изотермах: 20, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 250, 300, 350, 360°С. Измерения выполнены на установке, осуществленной по методу неразгруженного сферического пьезометра постоянного объема [1]. Проведены две серии измерений: первая с пьезометром, объем которого при 20°С и атмосферном давлении равен 185, 364 см<sup>3</sup>, вторая — объем пьезометра равен 804, 462 см<sup>3</sup>. На рисунке приведена принципиальная схема экспериментальной установки.

Установка состоит из двух термостатов, в которые помещены пьезометры 1 и 2 из стали X18H10T. В пьезометры впаяны шлифованные калиброванные капилляры 14 и 15 с внутренним диаметром 0,6 мм, с помощью которых осуществляется заполнение пьезометра веществом, а также фиксация объемов ртутными затворами 20 с электроконтактной фиксацией уровня ртути. Контактные платиновые кольца соединены с сигнальными лампочками контроля уровня ртути посредством ключевой транзисторной схемы, позволяющей значительно уменьшить ток в месте контакта ртути с кольцом. Внутренний диаметр текстолитовых шайб-изоляторов и контактных колец для первого пьезометра 0,8, для второго — 0,3 мм. Расстояние между верхними кольцами и средними (рабочими) 4 мм, что дает неопределенность в измерении объема 1 и 2 пьезометров соответственно 0,001 и 0,0001%. Контактные устройства соединены с автоклавами 25, на одну треть заполненными ртутью.

Давление в системе создавалось подачей сжатого азота (до 150 бар) из баллона 23 с последующим сжатием, его гидропрессом грузопоршневого манометра МП-2500 посредством масляного мультипликатора 27. Измерялось давление грузопоршневыми манометрами МП-2500, МП-600 класса 0,05 и МП-60 класса 0,02. Барометрическое давление измерялось образцовым ртутным барометром КР-5 класса 0,01. При вычислении величины абсолютного давления вводились поправки на разность уровней жидкостей в коммуникациях установки. Погрешность измерения давления, связанная с неточностью внесения этих поправок, не превышала 0,003 бар. Максимальная погрешность измерения давления соответствовала классу точности поршневых манометров.

Пьезометры термостатировались в жидкостных термостатах. В качестве теплоносителей до 90°С применялась вода, от 90 до 175°С — глицерин, свыше 175°С — селитряный расплав. Термостаты теплоизолированы стекловатой, снабжены мощными электрическими нагревателями 8, 11, 12, а также регулирующими нагревателями 7 мощностью 0,6 кВт, смонтиро-



Принципиальная схема экспериментальной установки:

1, 2 — сферические пьезометры; 3 — термостат; 4 — изоляция; 5 — теплоноситель; 6 — циркуляционный насос; 7 — регулирующий нагреватель; 8, 11, 12 — основные нагреватели; 9 — регулирующий термометр сопротивления; 10 — образцовые платиновые термометры сопротивления; 13 — штуцер для вывода капилляров из термостата; 14 — капилляр ртутного затвора пьезометра; 15 — выпускной капилляр; 16, 17 — «запаянный» капилляр; 18 — холодильник; 19, 20 — ртутные затворы; 21, 22 — выпускные вентили; 23 — азотный баллон; 24 — стакан пережимного сосуда; 25 — автоклав; 26 — ртуть; 27 — масляный мультипликатор; 28 — касторовое масло; 29 — разделительный сосуд к МП-60; 30 — трансформаторное масло

ванными на кварцевых стержнях и расположенными в зоне наибольшей турбулентности потока теплоносителя. Температура регулировалась специально разработанным фотоэлектронным автоматическим регулятором. В качестве датчиков использовались специальные малоинерционные термометры сопротивления 9 (номинальное сопротивление 100 ом). Температура в термостатах поддерживалась с погрешностью  $\pm 0,003^\circ \text{C}$ , причем колебания имели строго периодический характер, а величина периода устанавливалась блоком задержки времени обратной связи и для разных температурных режимов изменялась от 15 до 50 сек. Расчеты показали, что за счет затухания амплитуды колебаний в стенке пьезометра колеба-

ния температуры исследуемой жидкости не превышали  $\pm 0,0005^\circ\text{C}$ . Температура в каждом термостате измерялась двумя образцовыми платиновыми термометрами сопротивления типа ТСП-10 первого разряда. Показания обоих термометров совпадали с точностью  $0,004^\circ\text{C}$ . Измерение производилось компенсационным методом с применением потенциометра Р348 класса 0,002 и образцовых катушек сопротивления класса 0,001, которые термостатировались при  $21^\circ\text{C}$  с точностью  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

Объемы пьезометров определялись по количеству воды, заполняющей их при температуре  $20^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении. Для первого пьезометра определяли объем при  $20^\circ\text{C}$  и давлении 12–13 бар. В качестве исходных данных по удельным объемам воды в первом случае приняты данные [2, 3], во втором — данные [4]. Предварительно вакуумированный пьезометр заполнялся бидистиллятом, полученным на редистилляторе Ре-5 с серебряным кубом. Заполнение производилось при температуре воды 96–99 $^\circ\text{C}$  для удаления из нее растворенного воздуха. Так как даже при длительном вакуумировании не удается полностью удалить воздух, адсорбированный стенками капилляров и пьезометра, который в дальнейшем может существенно исказить результаты, после первого заполнения производилось выпаривание воды (конечная температура  $300^\circ\text{C}$ ) с последующим охлаждением пьезометра. За счет образовавшегося глубокого вакуума в пьезометре производилось новое заполнение, устанавливалось равновесное состояние при  $20^\circ\text{C}$ , фиксировался объем и производился нагрев пьезометра до  $250^\circ\text{C}$  с выпуском воды. Поправка на количество воды, оставшейся в пьезометре в виде пара, определялась в два приближения, она равна для первого и второго пьезометров соответственно 90 и 400 мг (0,05%) и вносилась с погрешностью не более 1 мг (0,0005%). Поправка на количество жидкости в балластном объеме определялась экспериментально методом «запаянного капилляра». Она составляет около 150 мг (соответственно 0,08 и 0,02%) и вносится с погрешностью 1% (0,0005 и 0,0001%). Масса выпущенной из пьезометров жидкости измерялась на аналитических весах типа WA-31 первого класса. Предельная погрешность определения массы жидкости равна 0,001%. Для пьезометра 1 проведено семь измерений объема, для 2 — три измерения. Объемы пьезометров 1 и 2 равны соответственно  $185,364 \pm 0,013 \text{ см}^3$  и  $804,462 \pm 0,032 \text{ см}^3$ . Границы доверительных интервалов определены для коэффициента надежности  $\alpha = 0,95$ . Относительные погрешности определения объемов пьезометров составляют 0,007 и 0,004%. (Для сравнения укажем, что в опытах [4] относительная погрешность определения объема при  $\alpha = 0,95$  составляет 0,012%.)

Удельный объем воды определялся по известному значению объема пьезометра  $V_{t,p}$  и массе воды, заполняющей пьезометр, при заданных параметрах  $t$  и  $p$ . Поправки на изменение объемов пьезометров в зависимости от температуры и давления первоначально рассчитывались по формулам

$$V_{t,p_0} = V_{20,p_0} [1 + 3\alpha(t - 20)], \quad (1)$$

$$V_{t,p} = V_{t,p_0} \left[ 1 + \frac{3(1 - 2\sigma)}{E} \frac{pr_1^3 - p_0r_0^3}{r_0^3 - r_1^3} \right], \quad (2)$$

где  $V_{t,p_0}$  — объем пьезометра при температуре опыта  $t$  и атмосферном давлении  $p_0$ ;  $r_1$  и  $r_0$  — внутренний и наружный радиусы пьезометров;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала пьезометра;  $\sigma$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль растяжения (модуль Юнга). Значения  $\alpha$ ,  $\sigma$  и  $E$  в зависимости от температуры приняты по данным [5]. Формула (2) впервые приведена в работе [6]. Обосновывая применение сферического неразгруженного пьезометра, авторы [6], основываясь на формуле (2), указывают, что поправка на изотермическую деформацию должна быть на порядок меньше, чем в случае цилиндрического пьезометра такого же объема.

Расчетная относительная погрешность определения удельного объема с учетом ошибок внесения поправок, а также ошибок отнесения составляет для пьезометров 1 и 2 соответственно 0,043 и 0,018% и лишь при больших удельных объемах ( $0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ ) может возрасти до 0,110%. Однако в предварительных опытах на изотерме  $25^\circ \text{C}$ , а также при попытке использовать измерения на изотермах  $250$  и  $300^\circ \text{C}$  для определения объемов пьезометров обнаружены расхождения с данными международных скелетных таблиц (МСТ) 1963 г. [8], значительно превышающие ожидаемую погрешность определения удельного объема, а также погрешности определения объемов пьезометров. Так как расхождения носили систематический характер, детально анализировались методики введения поправок. Опытами с пьезометрами, существенно отличающимися по объему, подтверждалась правильность методик введения поправок [1] на остаток пара в пьезометре и на балластный объем. Следует отметить, что при тщательном измерении геометрических размеров капилляров, полостей специальных вентиляей 21 и 22, точном знании изменения температуры по длине капилляров 14 и 16 в переходной зоне, расчетная поправка на балластный объем совпадала с экспериментальной.

Расчеты показали, что использование приближенной формулы (1) при повышенных температурах может привести к систематической погрешности, которая при температуре  $400^\circ \text{C}$  достигала величины 0,015%. Поэтому в наших опытах введение поправки на термическое расширение пьезометров осуществлялось по формуле

$$V_{t, p_0} = V_{20, p_0} [1 + \alpha(t - 20)]^3. \quad (3)$$

Анализ расхождений наших предварительных данных по удельным объемам с данными МСТ показал, что расхождения увеличиваются при возрастании давления. Поэтому обращено особое внимание на методику введения поправки на изотермическую деформацию пьезометров. Анализ формулы (2) показал, что при невысоких давлениях (например, для пьезометра 1 — 7 бар) получается отрицательная величина поправки, что с физической точки зрения трудно объяснимо. Поэтому предпринята попытка вывода формулы для расчета изотермической деформации сферического пьезометра.

Как следует из математической теории упругости, приращение  $\Delta r$  текущего радиуса  $r$  полый сферы под влиянием давления может быть определено по следующей формуле [7, 9, 10]:

$$\Delta r = \frac{1}{3\lambda + 2\mu} \frac{pr_1^3 - p_0 r_0^3}{r_0^3 - r_1^3} r + \frac{1}{4\mu} \frac{r_0^3 r_1^3 (p - p_0)}{r_0^3 - r_1^3} \frac{1}{r^2}. \quad (4)$$

В теории упругости используются следующие соотношения:

$$k = \lambda + \frac{2}{3} \mu, \quad (5)$$

$$E = \frac{9k\mu}{3k + \mu}, \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{3k - 2\mu}{3k + \mu}, \quad (7)$$

где  $k$  — модуль всестороннего сжатия;  $\lambda$ ,  $\mu$  — коэффициенты Ламэ. С учетом (5) формула (4) примет вид

$$\Delta r = \frac{1}{3k} \frac{pr_1^3 - p_0 r_0^3}{r_0^3 - r_1^3} r + \frac{1}{4\mu} \frac{r_0^3 r_1^3 (p - p_0)}{r_0^3 - r_1^3} \frac{1}{r^2}. \quad (8)$$

Подставляя вместо  $k$  и  $\mu$  их значения из (6) и (7), получим

$$\Delta r = \frac{1-2\sigma}{E} \frac{pr_1^3 - p_0 r_0^3}{r_0^3 - r_1^3} r + \frac{1+\sigma}{2E} \frac{r_0^3 r_1^3 (p-p_0)}{r_0^3 - r_1^3} \frac{1}{r^2}. \quad (9)$$

С помощью (9) можно получить формулу для расчета изменения объема пьезометра в зависимости от давления. Заменяя текущий радиус  $r$  внутренним радиусом сферы  $r_1$  и пренебрегая членами высшего порядка малости, после ряда преобразований окончательно получим

$$V_{l,p} = V_{l,p_0} \left[ 1 + \frac{3(1-2\sigma)}{E} \frac{pr_1^3 - p_0 r_0^3}{r_0^3 - r_1^3} + \frac{3(1+\sigma)}{2E} \frac{r_0^3 (p-p_0)}{r_0^3 - r_1^3} \right]. \quad (10)$$

Из сравнения формул (2) и (10) видно, что в формуле Кейса — Смита отсутствует третий член правой части, который более чем на порядок превышает предыдущий. Этим и объясняется незначительная величина рассчитанной по формуле (2) поправки на изотермическую деформацию.

Формулу (10) можно также получить из общей теории упругости [11]. Если деформация вызывается приложенными к поверхности шара силами, то в векторных обозначениях уравнение равновесия примет вид

$$\nabla \operatorname{div} u = 0. \quad (11)$$

Решая (11) относительно деформации  $u = \Delta r$  и используя представление о радиальном напряжении и компонентах тензора деформации, нетрудно получить формулу перемещения (8), а затем (10).

Расчетная поправка на изотермическую деформацию по (10) для сферического пьезометра 2 (наружный диаметр 160, внутренний — 120 мм) при температуре 175° С и давлении 800 бар составляет 0,17% и вносится с точностью 1%. Погрешность, связанная с внесением этой поправки, составляет 0,0017%. Соответствующая поправка для цилиндрического пьезометра, имеющего наружный диаметр 160 и внутренний 120 мм при той же величине заполняемого жидкостью объема лишь в полтора-два раза больше указанной поправки для сферического пьезометра, т. е. с точки зрения величины деформации сферический пьезометр не имеет существенного преимущества перед цилиндрическим. Однако вывод формулы (10) строже, чем аналогичной формулы для цилиндра конечных размеров. Так как формула (2) использовалась в ряде работ по изучению  $P$ - $V$ - $T$ -зависимости веществ [1, 12–14], а также при исследовании теплоемкости методом сферического адиабатического калориметра [15], то, видимо, необходимо провести уточнение соответствующих экспериментальных данных.

Оценка погрешностей производилась по формулам

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial v}{\partial x_i} \Delta x_i \right|, \quad (12)$$

$$\frac{3\sigma_v}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial v}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (13)$$

Таким образом, рассчитывались относительные систематические предельная и среднеквадратичная погрешности, а по результатам тарировки пьезометров и проведении серии из шести измерений удельного объема при фиксированных параметрах  $p$  и  $t$  (100 бар и 250° С) оценивалась случайная погрешность. Коэффициент надежности при этом был принят равным 0,95. В табл. 1 приведены величины указанных погрешностей для пьезометров 1 и 2. Оценка погрешностей производилась для предельных параметров  $p$  и  $t$ .

Таблица 1

Вид погрешности, %	Пьезометры	
	1	2
Относительная предельная при $v > 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$	0,043	0,018
Относительная среднеквадратичная при $v > 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$	0,110	0,091
Случайная, оцененная по результатам тарировки пьезометров	0,022	0,009
Случайная, оцененная по результатам серии измерений удельного объема при фиксированных $t$ и $p$	0,044	0,039
	0,007	0,004
	0,009	—

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{ бар}$		Отклонения, бар	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{ бар}$		Отклонения, бар
	по данным МСТ	по данным авторов			по данным МСТ	по данным авторов	
175	8,925	8,935	-0,01	320	112,89	112,88	+0,01
230	27,979	27,982	-0,003	350	165,37	165,37	0,00
250	39,776	39,780	-0,004	360	186,74	186,73	+0,01
270	55,052	55,061	-0,009	370	210,53	210,52	+0,01
300	85,917	85,91	+0,007				

С целью проверки правильности измерения давления и температуры были поставлены опыты по измерению давления насыщения на изохоре, близкой к критической. Расхождения измеренных значений давления насыщения с данными [16] (см. табл. 2) не превышали допусков МСТ 1963 на линии насыщения.

В табл. 3 приведены опытные значения удельных объемов. Опыты проводились по изотермам. В двухфазной области и области пара измерения производились на изотермах 350 и 360° С. Экспериментальные данные первой серии, полученные на пьезометре 1, и второй серии, полученные на пьезометре 2 на изотерме 25° С, согласуются с точностью 0,006%.

Сравнение наших экспериментальных данных (см. табл. 4) с прецизионными измерениями удельных объемов [4], выполненными, как известно, методом цилиндрического разгруженного пьезометра, показало, что расхождения на изотермах 20, 25, 50, 100 и 150° С не превышают 0,011%. Расхождения на изотермах 75 и 125° С увеличиваются до 0,018%, видимо, за счет ошибки интерполяции экспериментальных данных [4] на указанные температуры. Таким образом, результаты данной работы и [4] согласуются с точностью, значительно превышающей суммарную погрешность эксперимента. Это свидетельствует о надежности полученных экспериментальных данных и предлагаемой методики введения поправок. Следует отметить, что данные [4] завышены по сравнению с нашими данными. Данные работы [17] на этих же изотермах с разбросом  $\pm 0,03\%$  отклоняются от данных настоящей работы.

Данные [18] на изотерме 300° С завышены по отношению к нашим данным. Максимальное отклонение  $\pm 0,16\%$  соответствует давлению 250 бар. На изотерме 350° С расхождения с данными [19] достигают +0,23%. Данные [20] на изотерме 350° С, полученные методом цилиндрического пьезометра, хорошо согласуются с нашими данными. Лишь при давлении 330 и 210 бар отклонения достигают -0,11 и -0,15% соответственно. Данные [12] на изотерме 360° С согласуются с нашими данными в пределах погрешности эксперимента. Исключение составляет область вблизи линии насыщения, где отклонения достигают  $\pm 0,55\%$ . Наилучшее согласие наших





Таблица 4

Сравнение экспериментальных данных настоящей работы с данными [4, 12, 17—20],  $\delta = (v_3 - v_n)/v_3$  100%

t, °C	p, бар												
	800	700	600	500	400	330	300	250	220	210	200	180	100
20	[4] —	—0,004	—0,004	—0,006	—0,003	—	—0,003	—	—	—	—0,005	—	—0,004
	[17] —0,005	+0,003	—0,005	—0,003	—0,007	—	—0,001	—	—	—	—0,002	—	+0,007
25	[4] —0,002	—0,004	—0,001	—0,002	—0,003	—	—0,003	—	—	—	—0,003	—	—0,003
	[17] —0,009	—0,011	—0,011	—0,013	—0,013	—	—0,012	—	—	—	—0,008	—	—0,004
50	[4] —0,007	—0,006	—0,002	—0,005	—0,006	—	—0,004	—	—	—	—0,003	—	—0,005
	[17] —0,018	—0,008	—0,010	—0,011	—0,009	—	—0,002	—	—	—	+0,004	—	+0,004
75	[4] —0,009	—0,011	—0,010	—0,011	—0,005	—	—0,009	—	—	—	—0,008	—	—0,008
	[17] —0,005	—0,005	—0,004	—0,010	—0,002	—	—0,004	—	—	—	—0,008	—	—0,004
100	[4] —0,005	—0,008	—0,006	—0,003	—0,008	—	—0,010	—	—	—	—0,009	—	—0,009
	[17] +0,013	+0,007	+0,008	+0,007	—0,001	—	—0,004	—	—	—	+0,020	—	—0,020
125	[4] —0,018	—0,002	—0,014	—0,015	—0,015	—	—0,014	—	—	—	—0,013	—	—0,014
	[17] +0,007	+0,021	+0,007	+0,001	—0,003	—	—0,010	—	—	—	—0,017	—	—0,031
150	[4] —0,003	—0,010	—0,007	—0,007	—0,008	—	—0,011	—	—	—	—0,009	—	—0,009
	[17] +0,029	+0,018	—0,007	+0,011	+0,010	—	—0,001	—	—	—	—0,008	—	—0,019
175	[17] —0,002	—0,001	—0,005	—0,007	—0,011	—	—0,017	—	—	—	—0,026	—	—0,039
300	[17] —	—	0	—0,05	—0,04	—	—	—0,03	—	—	—	—	—0,03
	[18, 19] —	—	+0,11	0	+0,04	—	—	+0,16	—	—	—	—	—
350	[17] —	—	+0,05	+0,03	+0,05	—	+0,05	—	—	—0,05	—	—	—
	[20] —	—	—	—	—	—0,11	—0,05	+0,03	—	—0,15	—	—	—
	[18, 19] —	—	—	+0,18	—	—	+0,23	—	—	—	—	—	—
360	[12] —	—	—	—	—	—0,04	—0,04	0	+0,07	—	+0,10	+0,55	—
	[17] —	—	+0,02	+0,07	+0,05	+0,05	0	—0,05	—0,18	—0,33	—0,33	—0,33	—

данных на изотерме 250, 300, 350 и 360° С наблюдается с расчетными данными [17], составленными на основе МСТ 1963 г. Лишь вблизи линии насыщения расхождения достигают -0,33%. В области пара на изотермах 350 и 360° С наши данные в пределах 0,02÷0,04% согласуются с расчетными данными [17].

По экспериментальным  $P$ - $V$ - $T$ -данным при температуре 360° С методом Кейса вычислены второй  $B_1$  и третий  $B_2$  вириальные коэффициенты разложения по степеням плотности. Значения  $B_1$  и  $B_2$  равны соответственно  $-4,875 \text{ см}^3/\text{г}$  и  $+4,4 \text{ см}^6/\text{г}^2$ . Для сравнения наших экспериментальных данных по  $B_1$  и  $B_2$  с данными других исследователей рассчитаны второй и третий вириальные коэффициенты при 360° С по эмпирическим уравнениям [21], составленным в результате обработки экспериментальных данных о вириальных коэффициентах в интервале 150–450° С, полученных методом разгруженного цилиндрического пьезометра,  $B_1 = -4,88 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $B_2 = +3,22 \text{ см}^6/\text{г}^2$ .

Рассчитаны также  $B_1$  и  $B_2$  по уравнению [22]:  $B_1^{\text{в.т.с.}} = -4,80 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $B_2^{\text{в.т.с.}} = -0,55 \text{ см}^6/\text{г}^2$ . Из сравнения найденных  $B_1$  видно, что наши данные по второму вириальному коэффициенту находятся в хорошем согласии с данными [21] и [22]. Что касается третьего вириального коэффициента, то согласие  $B_2$  с  $B_2^{\text{в.т.с.}}$  можно считать удовлетворительным, тем более, что в области температур  $\sim 360^\circ \text{С}$  точность определения  $B_2$  низкая. Значения третьего вириального коэффициента работы [22] значительно отклоняются как от данных [21], так и от значения, найденного по результатам настоящей работы.

В области двухфазного состояния наклон изотерм не обнаружен. Значения давления насыщения, полученные в опытах по изотермам 350 и 360° С и на изохоре, совпадают с точностью 0,01 бар.

Авторы выражают благодарность С. Л. Ривкину и А. А. Александрову за полезное обсуждение работы.

Грозненский нефтяной институт  
им. М. Д. Миллионщикова

Поступила в редакцию  
20 II 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Л. Ривкин, Т. С. Ахундов. Теплоэнергетика, № 1, 57, 1962.
2. Д. Перри. Справочник химика. «Химия», 1969.
3. N. S. Osborn, H. F. Stimson, D. F. Grinnings. J. Res. NBS, 23, 197, 261, 1939.
4. G. S. Kell, E. Whalley. Philos. Trans. Roy Soc., London, Ser. A., Mathem. Phys. Sci., 258, 565, 1965.
5. Спр. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике (под ред. Б. Е. Неймарк). «Энергия», 1967.
6. F. G. Keyes, L. B. Smith. Proc. Amer. Acad., 68, 505, 1933.
7. A. E. H. Love. Mathematical theory of elasticity, London, 1927.
8. Международные скелетные таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара 1963 г. Теплоэнергетика, № 4, 84, 1964.
9. A. E. H. Love. Lehrbuch der Elastizität, Leipzig und Berlin, 1907.
10. A. E. H. Love. Mathematical theory of elasticity. New York, 1944.
11. Л. Д. Ландау, Е. Н. Лифшиц. Теория упругости. «Наука», 1965.
12. С. Л. Ривкин, Г. В. Троянская. Теплоэнергетика, № 10, 22, 1964.
13. С. Л. Ривкин, Т. С. Ахундов, Е. А. Кременовская, Н. Н. Ассадулаева. Теплоэнергетика, № 4, 59, 1966.
14. С. Л. Ривкин. Автореф. докт. дис., М., 1965.
15. Г. В. Степанов. Автореф. канд. дис., Махачкала, 1969.
16. N. S. Osborn, K. H. Meyers. J. Res. NBS, 13, 1, 1934.
17. М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. «Стандарты», 1969.
18. М. П. Вукалович, В. Н. Зубарев, А. А. Александров, Ю. Я. Калинин. Теплоэнергетика, № 10, 74, 1959.
19. Ю. Я. Калинин. Автореф. канд. дис., М., 1960.
20. L. B. Smith, F. G. Keyes. Mech. Eng., 53, 135, 1931.
21. G. S. Kell, G. E. McLaurin, E. Whalley. J. Chem. Phys., 48, 3805, 1968.
22. М. П. Вукалович, М. С. Трахтенгерц, Г. А. Спиридонов. Теплоэнергетика, № 7, 65, 1967.