

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛИИ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ВОДЫ

Седьмая Международная конференция по свойствам воды признала необходимым вести разработку новых уравнений состояния, которые бы более полно и точно описывали термические и калорические свойства воды. Наиболее перспективными признаны уравнения, имеющие определенный физический смысл, полученные с использованием небольшого числа опытных данных и так называемых предельных условий. К числу этих условий относятся:

1. При достаточно больших удельных объемах уравнение состояния переходит в уравнение идеального газа.

2. Значение критических параметров должно определяться уравнением с максимальной точностью  $P_{кр}$ ,  $V_{кр}$ ,  $T_{кр}$ .

3. В критической точке первая производная  $(\frac{\partial P}{\partial V})_{T_{кр}}$  равна нулю.

4. В критической точке вторая производная  $(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2})_{T_{кр}}$  равна нулю.

Вода имеет исключения из законов сжимаемости, характерных для большинства рабочих тел. Одной из ее аномалий является наличие максимума плотности. Этот факт позволяет потребовать от уравнения выполнение еще двух условий.

5. На линии максимума плотности первая производная  $(\frac{\partial V}{\partial T})_P$  должна быть равной нулю.

6. Уравнение состояния должно давать достаточно точное описание однозначной зависимости удельного объема и давления на линии аномалии  $V_m = f(P)$ .

Однако для использования условий 2 – 6 необходимо располагать достаточно точными экспериментальными данными. И если для критической точки таковые имеются [1], то для аномалии удельного объема положение несколько иное. В работах [5, 7] показано, что последние исследования, в той или иной мере затрагивающие аномальное изменение объема воды, проводились в начале века. Результаты многих из них приведены в монографии Дорси [6]. Из этих работ следует выделить две: исследования, поставленные Амага [6], и более поздние опыты Бриджмена [6]. Первые по признанию большинства исследователей наиболее точные. Но в оценке величины погрешности данных Амага имеются значительные

расхождения. Если Эккерт [7] их погрешность оценил величиной 0,02%, то в работе [2] эта величина оговорена 0,2%. Работа Бриджмена отличается тем, что аномалия объема имеет отличное от других количественное и качественное истолкование. Представляется затруднительным отдать предпочтение каким-то одним данным или провести их совместное использование.

В связи с вышеизложенным в этой работе поставлена задача получить достаточно точные данные по аномалии плотности, а также  $P$ ,  $V$ ,  $T$  значения с малым шагом по температуре для интервала  $0^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ . Наличие  $P$ ,  $V$ ,  $T$  данных необходимо для точного вычисления величины  $\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_P$  [7].

Данная область параметров для воды характерна наличием прецизионных изотерм  $0^{\circ}\text{C}$  и  $10^{\circ}\text{C}$ , приведенных в работе [8]. Это обстоятельство облегчает решение задачи, позволяет сконцентрировать внимание не на определении удельного объема, а на найденной величине аномалии, абсолютная величина которой имеет близкий порядок к погрешности определения удельного объема.

Для исследования аномального изменения объема был выбран метод пьезометра постоянного количества вещества, ибо его основная идея - сохранение массы испытуемой пробы при переменном объеме - позволяет провести наиболее простое решение поставленной задачи. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Цилиндрический пьезометр, неразгруженный от давления и рассчитанный на работу в зоне упругих деформаций, выполнен из стали GX18H9T. В него одним концом вклеивается толстостенный капилляр, изготовленный из молибденового стекла. Вторым - капилляр вклеен в разделительный сосуд и погружен в ампулу со ртутью. Изменение объема испытуемой пробы, находящейся в пьезометре, определялось по перемещению столбика ртути в капилляре. Последний проецировался на экран, масштаб увеличения при этом был близок к 40. Сечение капилляра и его изменение по длине определено с погрешностью 0,5% и соответствовало эквивалентному цилиндрическому диаметром  $1,1 \cdot 10^{-3}$  м. Наружный диаметр капилляра равнялся  $7,0 \cdot 10^{-3}$  м. Объем пьезометра  $V_{\text{п}}^{\circ} = 51,98 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  выбирался с учетом того, чтобы перемещение столбика ртути в капилляре за опыт не превышало размеры поля проектора. Это обеспечивало в каждом опыте постоянное положение относительно друг друга проектора, капилляра, экрана. Длина капилляра  $L = 0,765$  м определялась массой пробы  $M = 52,63 \cdot 10^{-3}$  кг и

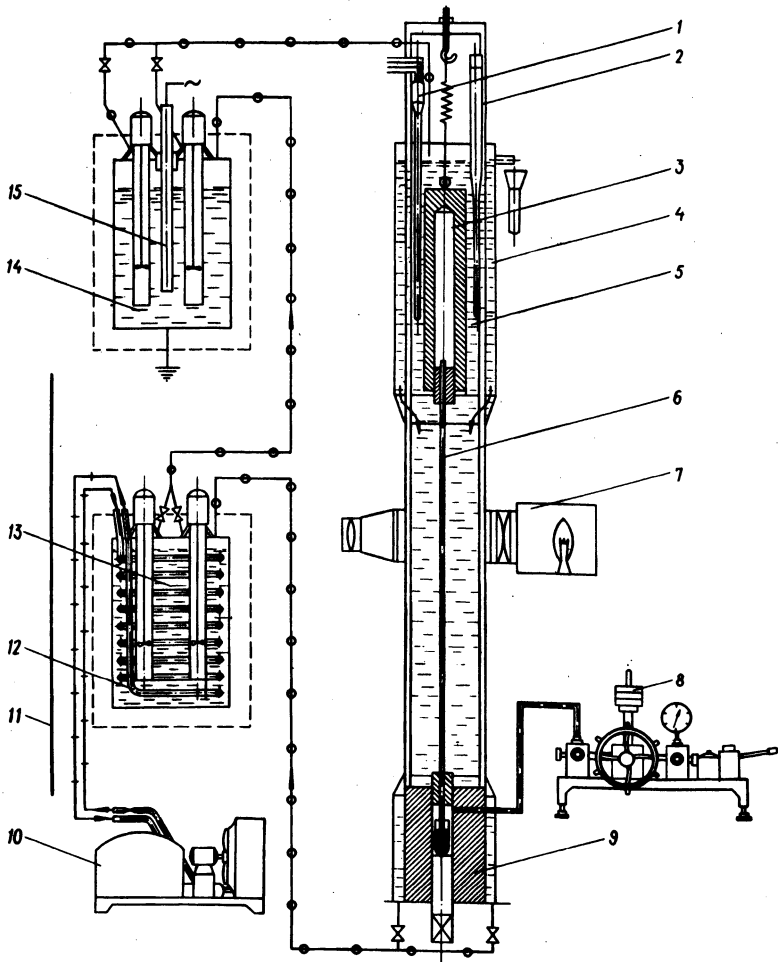


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 - платиновый термометр сопротивления; 2 - метастатический термометр; 3 - пьезометр; 4 - охранный термостатирующий поток; 5 - основной термостатирующий поток; 6 - капилляр; 7 - проектор; 8 - грузопоршневой манометр; 9 - разделительный сосуд; 10 - компрессионная холодильная установка; 11 - экран; 12 - испаритель холодильной установки; 13 - охлаждающий термостат; 14 - термостат точной регулировки температуры; 15 - электрод объемного нагрева.

предельным давлением, на которое рассчитывалась установка,  $P = 30$  МПа.

Пьезометр, капилляр и разделительный сосуд термостатировались в потоке антифриза, причем в области пьезометра осуществлялось двойное термостатирование по принципу поток в потоке. Этим достигалась равномерность поля температур пьезометра по его длине. Однородность температурного поля по сечению пьезометра достигалась равномерным распределением потока антифриза с помощью специального направляющего аппарата. Во времени температура регулировалась либо автоматически, либо вручную. Погрешность термостатирования в пространстве и времени не превышала  $0,004$  °С.

Температура капилляра отличалась от температуры пьезометра. В самом неблагоприятном варианте разница не превышала  $0,1$  °С. По длине капилляра данная разность температур уменьшалась от максимальной у разделительного сосуда ( $0,1$  °С) до нуля у пьезометра. Таким образом, налицо балластный объем, величина которого значительна  $V_6 = 0,849 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, что составляет  $1,4\%$  от  $V_{\text{п}}^0$ . Благодаря малой разнице температур  $\Delta T < 0,1$  °С, а главное, что в интересующей области параметров значение производной  $\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_P \approx 0$ , ошибка, обусловленная наличием балластного объема в опытах, составила величину не более  $0,0001\%$ .

Очень узкий рабочий диапазон температур в опытах (объясняемый их спецификой) позволил для измерения температуры наряду с традиционным методом прецизионных измерений, основанным на применении платинового термометра сопротивления (ТСП), использовать другой. Это не совсем обычный, но более удобный и не менее точный способ, в котором используется метастатический термометр (МТ). По первому варианту температура определялась с помощью ТСП-10 № 1036, прошедшего государственную поверку и допущенного к применению по I разряду. Измерение сопротивления термометра проводилось компенсационным методом с использованием потенциометра Р-348 и комплекта приборов, который требует нормы измерения электрического сопротивления образцовых ТСП I разряда [3].

Все приборы прошли государственную поверку, признаны годными и допущены к применению по своим классам. Все работы по выполнению измерительной схемы, измерению сопротивления и расчету температуры выполнялись согласно требованиям метрологии [3]. Для выявления возможных системати-

ческих ошибок измерения в работе был применен совершенно иной метод определения температуры, о котором упоминалось выше. Как известно, МТ предназначены только для измерения малых разностей температур, но точность определения последних чрезвычайно высока. В этом случае, если мы достаточно точно знаем начальную температуру  $T_1$ , то в пределах  $\pm 5^\circ\text{C}$ , определяемых шкалой МТ, можно с небольшой погрешностью найти конечную температуру  $T_2$ , отличающуюся от начальной на измеренную с помощью МТ некоторую разность температур  $\Delta T$ . Иначе  $T_2 = T_1 + \Delta T$ . Ошибка в определении  $T_2$  зависит от качества проведенного измерения разности температур  $\Delta T$  и достоверности начального значения  $T_1$ . Температура  $T_1$  устанавливалась по постоянной точке  $0^\circ\text{C}$ , а проверялась по температуре тройной точки. Реализовывались указанные постоянные точки согласно инструкциям [2, 3]. Как известно, температура тройной точки воспроизводится с погрешностью  $0,0001^\circ\text{C}$  [2]. Определяемая по МТ разность температур  $\Delta T$  с внесением всех поправок и соблюдений требований метрологии была ухудшена ошибкой не более  $0,004^\circ\text{C}$ . Разница в значении температуры, определенной по первому варианту (ТСП) и по второму (МТ), не превышала  $0,01^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения температуры в работе составила величину не более  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ .

Давление в работе измерялось грузо-поршневыми манометрами МП-600 и МП-60. Манометры прошли государственную поверку и признаны годными к применению по классу 0,05. При определении давления вводились поправки на температуру окружающей среды, потерю веса грузов в воздухе, ускорение свободного падения, гидростатическое давление столбов масла, ртути, воды и избыточное давление, обусловленное наличием мениска ртути в капилляре. В результате систематическая ошибка измерения давления зависела лишь от класса манометров и составила величину 0,05% от  $P_i$ , поскольку  $P_i > 10\% P_p$ . Здесь  $P_i$  - измеряемое давление;  $P_p$  - предельное и давление для манометра.

Опыты проводились по изобарам в интервале температур  $(-2^\circ\text{C}) - (10^\circ\text{C})$ . Такая методика требует длительного эксперимента, но при этом имеется возможность непосредственного определения минимального объема и, наконец, при вычислении удельного объема исключается достаточно большая и весьма грубо определяемая поправка на изотермическую деформацию. На каждой изобаре принимались реперная и контрольная точки. Для этой цели использовались прецизионные изотермы Келла и

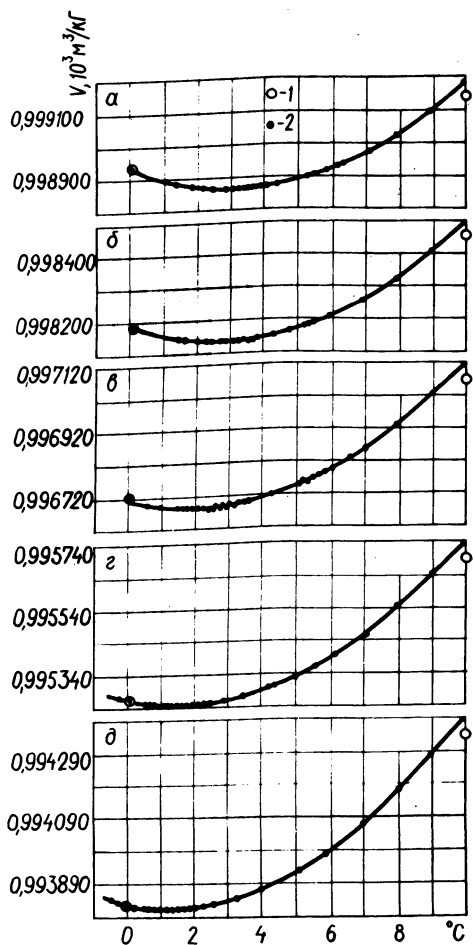


Рис. 2. Результаты эксперимента: а - изобара 2,533 МПа; б - изобара 4,000 МПа; в - изобара 6,934 МПа; г - изобара 9,864 МПа; д - изобара 12,797 МПа; 1 - экспериментальные значения, полученные в данной работе; 2 - значения удельных объемов согласно [8].

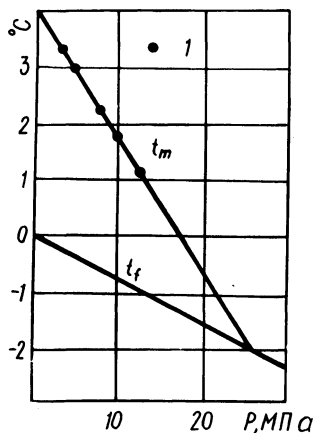


Рис. 3. Сравнение экспериментальных значений полученных минимумов с данными [6]:  $t_m$  - линия минимумов [6];  $t_f$  - линия образования льда [6]; 1 - экспериментальные значения, полученные в данной работе.

Валлея [8]  $0^{\circ}\text{C}$  и  $10^{\circ}\text{C}$ . Роль каждой изотермы определялась в каждом опыте из расчета получения минимальной ошибки. Определив изменение объема пробы по отношению к реперной точке, которая для данной изобары постоянна, можно найти искомую величину удельного объема с введением лишь термической поправки. Последняя, как известно, определяется весьма точно. Значение коэффициента линейного расширения  $\alpha$  принималось по данным Тоцкого [4] с учетом зависимости его от температуры. Видимо, это наиболее точные данные коэффициента  $\alpha$  для стали 1X18H9T. По данным авторов, погрешность не более 1%. Значение термической деформации капилляра настолько мало, что, приняв среднее значение коэффициента  $\alpha$  для молибденового стекла, мы практически не отягчаем результат дополнительной погрешностью. Конечная формула для определения удельного объема

$$V_x = V_0 \pm \frac{\Delta V_{\text{ох}}}{M} .$$

Здесь  $V_x$  - искомое значение удельного объема;  $V_0$  - значение удельного объема в реперной точке, рассчитанное по уравнению реперной изотермы;  $M$  - масса пробы, величина которой в опытах не изменялась и составила величину  $52,63 \cdot 10^{-3}$  кг;  $\Delta V_{\text{ох}}$  - изменение объема пробы, которому соответствует расчетное перемещение мениска ртути в капилляре. Знак (+) или (-) определялся в каждом конкретном случае в зависимости от положения столбика ртути и соотношения реперной и данной температуры.

Для получения надежных данных на каждой изобаре определялось значение отдельного объема в контрольной точке. Во всех случаях расхождение составило не более 0,005%, что хорошо видно на рис. 2, где представлены экспериментальные данные, опорные и контрольные значения удельного объема согласно изотермам Келла [8]. Разрывы по оси ординат вызваны необходимостью выдержать размеры страницы при сохранении масштаба, обеспечивающего наглядность изображения. К настоящему времени получено 159 экспериментальных значений удельного объема на 5 изобарах, приведенных здесь. Наилучшее совпадение при этом выявилось с данными Амага. На рис. 3 согласно [6] нанесены кривые минимума удельного объема, образования льда, а также значения температур и давлений на линии минимума, полученные в данной работе.

Погрешность экспериментальных данных, как показала оценка, не превышает 0,01%.

### Л и т е р а т у р а

1. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М., 1969.
2. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е. Исследование термодинамических свойств веществ. Л. - М., 1963.
3. Поверка приборов для температурных и тепловых измерений. Сборник инструкций, методических указаний и государственных стандартов. М., 1965.
4. Тоцкий Е.Е. Опытное определение коэффициента линейного расширения металлов сплавов. - "Теплофизика высоких температур". Т.2, 1964, №2.
5. Заворский Р., Кинан И. Термодинамические свойства воды в области максимальной плотности. - Труды Американского общества инженеров механиков. Т. 34, сер. E, 1967, № 2.
6. Dorsey N.E. Properties of Ordinary Water Substance, New York, 1940.
7. Eckart C. Properties of Water - "Amer. Journal of Sci". P.2. Apr. 1958.
8. Kell G., Hallett E. The PVT properties of Water. - Philosophical transactions of the Royal Society". London, ser. A, 1965.

В.Ф. Степанчук, Е.Г. Мигуцкий

### К РАСЧЕТУ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ДВУХФАЗНЫХ ВОДО-ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

Теплообмен в двухфазных водо-воздушных потоках имеет ряд специфических особенностей, в значительной мере отличающих его от теплообмена в однофазных потоках. Этот факт подтверждается как авторами работ [1,2], так и экспериментальными данными, полученными в настоящей работе.

Характерная зависимость  $Nu = f(\Delta t)$  для calorиметра диаметром  $d = 12$  мм и числа  $Re = 8,75 \cdot 10^3$  при различных действительных плотностях орошения  $N_D$  при поперечном