

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. А. Благонравов, И. В. Самородская, К вопросу о влиянии сильфонного приемника на результаты высокотемпературных измерений изобарной теплоемкости, *ТВТ*, 1992, том 30, выпуск 1, 145–149

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: 18.97.14.81

8 февраля 2025 г., 03:07:54



УДК 536.632.1 © 1992 г.

Л. А. Благоврагов, И. В. Самородская

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СИЛЬФОННОГО ПРИЕМНИКА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

С помощью прямого эксперимента и расчетным путем установлено, что влияние сильфона на результаты высокотемпературных измерений изобарной теплоемкости мало и определяется параметром $\beta = (\partial V / \partial P)_T / (\partial V / \partial P)_{\text{сильф}}$, где $(\partial V / \partial P)_T = V_0 K_T$, K_T — коэффициент изотермической сжимаемости исследуемой среды, V_0 — объем ячейки, $(\partial V / \partial P)_{\text{сильф}}$ — сжимаемость сильфона, определяемая экспериментально.

Способы измерения изобарной теплоемкости жидкометаллических образцов в области состояний, приближающихся к критической точке, до настоящего времени не являются досконально разработанными. Поэтому существует потребность в проработке некоторых методических вопросов, важных с точки зрения оценки достоверности получаемого экспериментального материала. Одним из них является вопрос о влиянии сильфонных приемников (как почти обязательных элементов конструкции измерительной ячейки) на результаты измерения изобарной теплоемкости. Сильфоны широко используются в высокотемпературных теплофизических экспериментах из-за возможности производить с их помощью механические воздействия на исследуемую жидкую среду в условиях герметичной защиты ее от окружающей атмосферы. Однако использование сильфонов порождает и определенные проблемы. Прежде всего возникает вопрос об учете жесткости сильфона. При высоких температурах, когда исследуемая жидкость, расширяясь, сильно деформирует (растягивает или сжимает) сильфон, приходится вносить поправку для определения истинного давления, при котором находится жидкость. Эта поправка определяется сравнительно легко.

Недостаточно изучена проблема, также связанная с использованием сильфонов, но имеющая преимущественное отношение лишь к измерениям изобарной теплоемкости. Поскольку процесс измерения изобарной теплоемкости связан с изменением объема жидкого металла, а жесткость сильфона оказывает сопротивление такому изменению, то возникает вопрос, в какой мере это явление отражается на результатах измерения теплоемкости. Можно ожидать, что наличие жесткого сильфонного приемника должно привести к занижению получаемых в эксперименте значений теплоемкости по сравнению с истинными.

В этой связи в данной работе была поставлена задача: установить, есть ли существенное различие в результатах измерений, проведенных с ячейками, снабженными сильфонными приемниками, и с ячейками, у которых такой приемник отсутствует. Использовались методика и установка, описанные в [1, 2]. Для измерения теплоемкости жидких щелочных металлов применялся метод периодического нагрева. Измерительная ячейка, имеющая вид тонкого и длинного стержня, нагревалась протекающим по ней электрическим током, имеющим постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая мощности обеспечивала поддержание

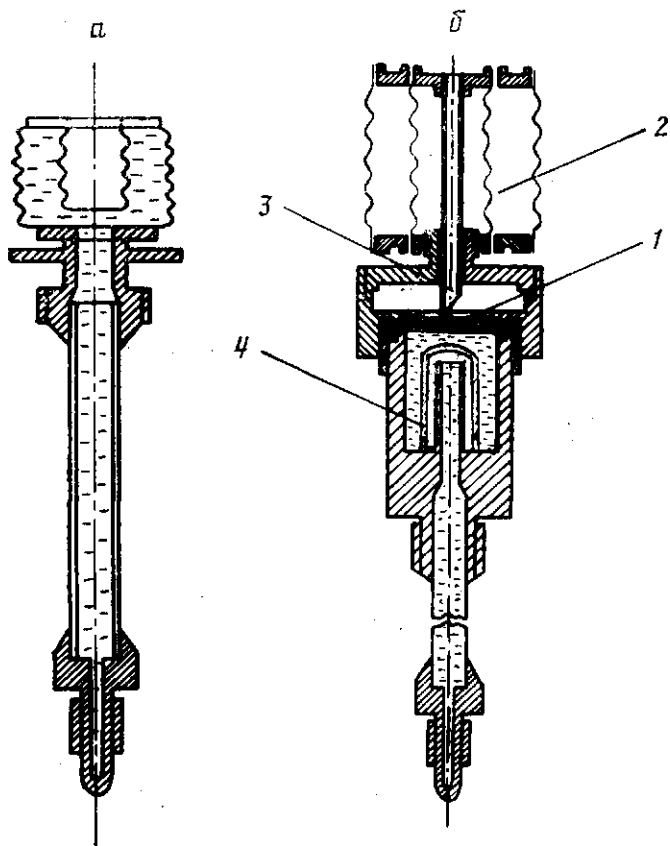


Рис. 1. Герметичная (закрытая) ячейка с сифонным приемником (а) и бессифонная (открытая) ячейка (б)

в образце нужной температуры, переменная составляющая вызывала температурные колебания в нем. Измерительная ячейка представляла собой заполненную жидким металлом молибденовую трубку, которая помещалась в автоклав, заполненный нейтральным газом. Для решения задачи, поставленной в настоящей работе, использовались ячейки двух типов.

Ячейки первого типа были герметичны. Подача давления газа к жидкому металлу осуществлялась благодаря сифонному приемнику [1, 2]. Конструкция такой ячейки изображена на рис. 1, а. В ячейках второго типа (рис. 1, б) сифонный приемник (жесткость которого могла бы повлиять на результаты измерений) отсутствует. При заполнении жидким металлом ячейки этого типа герметизировались молибденовой мембраной 1. После того, как заполненная ячейка помещалась в камеру высокого давления для проведения измерений, производилась ее разгерметизация с помощью специального устройства 2, подробно описанного в [3]. Устройство срабатывало при резком изменении давления в камере на несколько атмосфер, при этом игла 3 прокалывала мембрану 1. Поскольку после разгерметизации нейтральный газ вступает в прямой контакт с жидким металлом, возникает опасность проникновения газа внутрь рабочей зоны исследуемого образца. Известно, что растворимость аргона в щелочных металлах возрастает с ростом температуры [4]. В представленной конструкции ослабление процесса диффузии газа в рабочую зону достигается благодаря сифону 4, который принуждает газ, диффундирующий в ячейку,

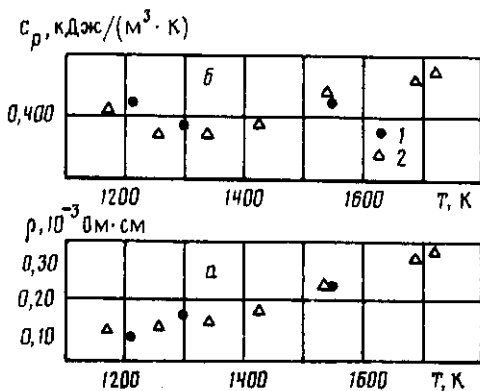


Рис. 2

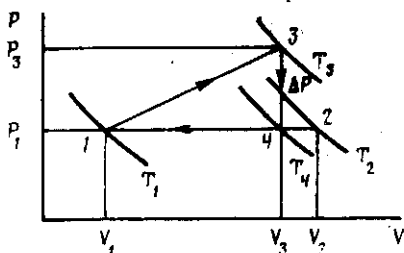


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления жидкого цезия от температуры (а: 1 — закрытая ячейка, 2 — открытая ячейка) и зависимость изобарной теплоемкости жидкого цезия от температуры (б)

Рис. 3. PV -диаграмма термодинамического цикла

проходить по двум коаксиальным каналам сначала вниз, потом вверх. Наличие осевого температурного градиента (внизу температуры выше) создает такие условия, что в одном случае направление диффузии газа совпадает с направлением температурного градиента, в другом — противоположно. Таким образом, на одном из участков создаются условия, препятствующие проникновению газа в ячейку. Однако, как показал опыт, указанная мера позволила лишь заметить этот процесс. Контроль за растворением нейтрального газа (аргона) в жидком металле (цезии) осуществлялся путем измерения сопротивления образца. На изобаре 11 МПа удалось измерить изобарную теплоемкость с использованием ячеек обоих типов. Из-за сложности проведения экспериментов с открытыми ячейками оказалось возможным отобрать только три точки, для которых значения удельного сопротивления согласуются с полученными в условиях, не осложненных процессом растворения газа в жидком металле. На рис. 2, а приведены опытные данные для удельного сопротивления, полученные для обоих типов ячеек. На рис. 2, б сопоставлены значения изобарной теплоемкости цезия, полученные на открытых ячейках (2) и на ячейках закрытого типа (1). Как видно из рис. 2, б, эксперимент не выявляет существенного систематического расхождения между сериями точек, полученных на ячейках открытого и закрытого типа. Хотя этот вывод делается на основании прямого эксперимента, результат не может полностью удовлетворить, так как величина экспериментальной погрешности составляет $\sim 10\%$. Поэтому ниже приводится результат расчета, сделанного с целью получения более точной оценки поправки к результатам измерений, выполненных на ячейках с сильфонными приемниками.

Влияние сильфона на термодинамический процесс, протекающий при измерении теплоемкости, удобно рассматривать с помощью PV -диаграммы исследуемой среды (рис. 3). При измерении изобарной теплоемкости изучаемой среде сообщается количество тепла Q , в результате чего среда переходит из состояния 1 вдоль изобары P_1 в состояние 2 с параметрами: $P=P_1$, $V=V_2$, $T=T_2$. При этом $\Delta T_{21}=T_2-T_1=Q/c_p$. Сопоставим с этим идеальным изобарическим процессом другой процесс, при совершении которого давление в среде изменяется вследствие деформации сильфона. Для простоты будем считать, что избыточное давление внутри ячейки растет пропорционально увеличению объема. Следовательно, при сообщении среде количе-

ства тепла Q система перейдет в состояние 3 с параметрами: $P=P_2$, $V=V_3$, $T=T_3$ вдоль прямой, наклон которой определяется степенью жесткости сильфона. Таким образом, фактически определяемая теплоемкость c_x будет равна

$$c_x = \frac{Q}{T_3 - T_1} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{T_3 - T_1} = \frac{c_p \Delta T_{21}}{\Delta T_{31}}. \quad (1)$$

Для однозначного определения точки 3 (для нахождения, в частности, T_3 и P_3) требуется сформулировать еще два условия. Одно из них можно получить из рассмотрения цикла, состоящего из отрезка $1-3$, изохоры $3-4$

и изобары $4-1$. Из условия обратимости цикла следует, что $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$,

т. е. $\int_{T_1}^{T_3} \frac{\delta Q}{T} + \int_{T_3}^{T_4} \frac{c_v dT}{T} + \int_{T_4}^{T_1} \frac{c_p dT}{T} = 0$. Полагая, что теплоемкость среды на участке $1-3$ не зависит от температуры, запишем: $\delta Q = c_x dT$. В результате интегрирования получим уравнение

$$c_x \ln \frac{T_3}{T_1} = c_v \ln \frac{T_3}{T_4} + c_p \ln \frac{T_4}{T_1}. \quad (2)$$

Другое условие найдем из определения $\Delta P = P_3 - P_1$. С одной стороны, ΔP

$$\text{можно выразить через параметры сильфона: } \Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\text{сильф}} \Delta V_{31} = \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_{\text{сильф}} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \Delta T_{41}; \quad \text{с другой стороны, } \Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \Delta T_{34}.$$

Запишем это уравнение в сокращенном виде

$$\beta \Delta T_{41} = \Delta T_{34},$$

$$\text{где } \beta = \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_{\text{сильф}} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p / \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \quad \text{или} \quad \beta = \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T / \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_{\text{сильф}}. \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) образуют систему уравнений относительно трех неизвестных: c_x , ΔT_{34} , ΔT_{41} . Уравнение (2) можно упростить, разложив логарифм в ряд и ограничившись линейными членами. В результате получим $c_x \Delta T_{31} \approx c_v \Delta T_{34} + c_p \Delta T_4$. Здесь учтено также, что

$$\ln \frac{T_3}{T_4} = \ln \left(1 + \frac{\Delta T_{34}}{T_4} \right) \approx \frac{\Delta T_{34}}{T_4} \approx \frac{\Delta T_{34}}{T_1} + o(\alpha^2),$$

где $\alpha = \Delta T_{34} \Delta T_{41} / T_1$. Решая совместно уравнения (1)–(3), получим

$$c_x = c_p \frac{1}{1 + \beta} \left(1 + \frac{\beta}{\gamma} \right), \quad (4)$$

где $\gamma = c_p / c_v$. Так как $\gamma > 1$, то c_x , как и ожидалось, меньше истинной изобарной теплоемкости c_p . Оценим значение поправочного множителя при c_p , например при $T = 1800$ К. В данной оценке пренебрегаем температурной неоднородностью вдоль оси ячейки. Температуру цезия внутри сильфона считаем близкой к комнатной. Характеристика сильфона $(\partial V / \partial P)_{\text{сильф}}$ определяется экспериментально и равна $0,95 \cdot 10^{-11}$ м³/Па для сильфона

из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, диаметром 27 мм и количеством гофров, равным 10. Величина $(\partial V/\partial P)_T$ равна $V_0 k_T$, где k_T — коэффициент изотермической сжимаемости цезия. При $T=1800$ К и $P=11$ МПа коэффициент изотермической сжимаемости равен $20 \cdot 10^{-9}$ Па $^{-1}$, объем ячейки $V_0 = 3,2$ см 3 , поэтому $(\partial V/\partial P)_T = 6,4 \cdot 10^{-14}$ м 3 /Па. Таким образом, $\beta \approx 6,7 \cdot 10^{-3}$. Поскольку при этих условиях $c_p/c_v = 2$, величина поправки к изобарной теплоемкости цезия составляет 0,3%. Полученный результат указывает на то, что поправка к изобарной теплоемкости даже при весьма высоких температурах не превышает 1%. На основании косвенного анализа изобарной теплоемкости в [5] высказано соображение о возможной заниженности данных об изобарной теплоемкости [6, 7]. Результаты данной работы свидетельствуют о том, что заниженные значения теплоемкости не связаны с влиянием жесткого силфонного приемника, чего можно было ожидать на основе качественных соображений. Тем не менее, при измерении изобарной теплоемкости в непосредственной близости к критической точке необходимо оценивать различие между c_x и c_p либо по формуле (4), либо по более точной формуле, которую можно получить на основе приведенного выше рассмотрения, но не ограничиваясь лишь линейным приближением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Благоураов Л. А.* // Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-матем. наук. М.: МГУ, 1978.
2. Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals / Ed. R. W. Ohse, 1985. 387P.
3. *Благоураов Л. А.* // ПТЭ. 1988. № 6. С. 194.
4. *Мозговой А. Г., Сквородько С. Н., Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А.* // В сб.: Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. М.: ИВТАН, 1987. № 6 (88). 57 с.
5. *Благоураов Л. А., Шнерко В. Н.* // В сб.: Теплофизические свойства рабочих тел, теплоносителей и конструкционных материалов современной энергетики. М.: Изд-во МЭИ, 1985. С. 45.
6. *Alekseev V. A., Blagourov L. A., Philippov L. P.* // J. Physique. Colloque C. 8. Suppl. 8. T. 41. 1980. P. C8-607.
7. *Благоураов Л. А., Филиппов Л. П., Алексеев В. А., Шнерко В. Н.* // ИФЖ. 1983. Т. 3. № 3. С. 438.

Московский государственный
университет
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
4.07.91