

АДИАБАТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДОРОДА ДО 150 кбар

*В.В.Матвеев, И.В.Медведева, В.В.Прут,
П.А.Суслов, С.А.Шибеев*

Излагаются метод измерения давления и результаты определения адиабатического уравнения состояния твердого водорода до 150 кбар. Сжатие осуществлялось методом металлического Z -пинча, плотность измерялась рентгенографически, а давление – по уравнению состояния эталонного вещества.

Создание давления в несколько мегабар в молекулярном водороде при относительно низких температурах и получение металлического водорода возможно, по-видимому, лишь при адиабатическом сжатии. В ^{1, 2} приведены результаты по адиабатическому сжатию водорода, однако давление в этих работах измерялось методом численного моделирования, имеющим из-за неопределенности в оценке точности принятых приближений неконтролируемую погрешность ^{3, 4}. В настоящей работе используется более точный, прямой метод измерения давления, приводится полученное с его помощью адиабатическое уравнение состояния водорода до 150 кбар.

Сжатие осуществлялось методом металлического Z -пинча ⁵. Метод определения уравнения состояния иллюстрируется рис.1, где показана рентгенограмма цилиндрического „бутерброда“, состоящего из трех веществ: внешнего – алюминия, по которому течет ток, создающий давление, среднего – водорода и внутреннего – эталонного вещества с известным с высокой точностью уравнением состояния, в качестве которого здесь использовался калий ⁶. Для увеличения контрастности все вещества разделены никелевыми 10 мкм трубками. По рентгеновским снимкам, сделанным в начальный момент и в один из моментов сжатия, определялось относительное сжатие водорода и эталонного вещества, и по уравнению состояния эталонного вещества – давление. В предположении равенства давлений водорода и эталонного вещества определялось давление водорода.

Начальные параметры нормального водорода: $T = 4,2$ К, $P = 1$ бар. Длина рабочей части трубок 30 мм; радиусы показаны на рис.1. Ток с амплитудой 0,5 – 1,5 МА и четвертьпериодом 3,5 мкс генерировался конденсаторной батареей. Максимальное магнитное давление $H_0^2/8\pi = 22,5$ кбар, однако при осуществляемом здесь динамическом сжатии давление водорода значительно превосходит давление магнитного поля ⁵.

Рентгеновская съемка осуществлялась аппаратом со следующими характеристиками: видимый фокус 0,3 мм, длительность импульса 15 нс, эффективная жесткость ~ 100 кэВ. Из-

лучение регистрировалось рентгеновской пленкой без усиливающих экранов. Расстояние от фокуса до трубки 1 м, а от оси трубки до пленки 15 мм.

Точность рассматриваемого метода определяется следующими факторами: погрешностью измерения плотности водорода и эталонного вещества, погрешностью уравнивания состояния эталонного вещества, степенью радиальной однородности веществ, в частности, предположением о равенстве давления в водороде и эталонном веществе. В свою очередь точность измерения плотности определяется погрешностью измерения радиусов, погрешностью измерения начальных параметров, потерей массы из-за вытекания веществ вдоль оси. Обработка рентгенограмм показала возможность измерения радиуса с погрешностью < 10 мкм. Движение трубки не „смазывает” рентгенограмму, поскольку время экспозиции достаточно мало.

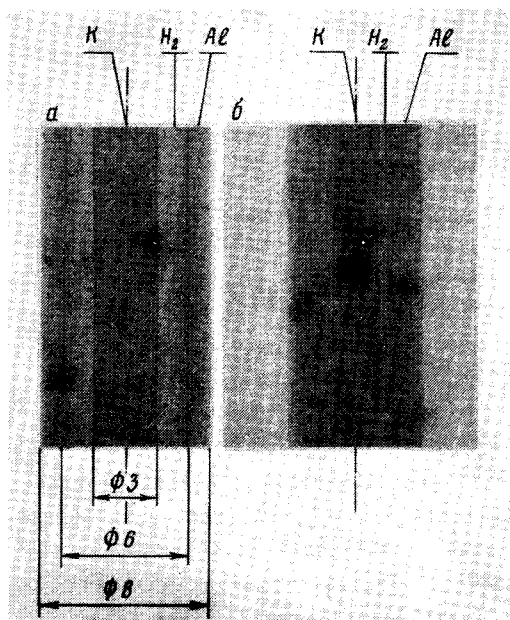


Рис.1. Рентгенограмма: а – начальный момент; б – момент сжатия

Невытекание водорода было экспериментально показано следующим образом. Центральная по длине область водорода выделялась двумя кольцевыми перегородками из медной фольги толщиной 20 мкм и диаметром 4 мм, расположенными на расстоянии 6 мм. Сравнение рентгенограмм, сделанных в начальный момент и в момент максимального сжатия, показало отсутствие вытекания с погрешностью $< 0,1$ %. Подтверждением невытекания может служить также однородное по длине, за исключением $2 \div 3$ мм от концов, сжатие трубки.

Степень радиальной однородности устанавливалась численными расчетами, проведенными в одномерном МГД приближении⁵. Расчеты показали, что степень неоднородности в регистрируемые моменты времени < 5 %. Для подтверждения радиальной однородности проводился эксперимент, в котором вместо калия намораживался водород. Измеренная степень неоднородности $\Delta P/P < 1\%$.

Относительная ошибка определения давления есть $\Delta P/P = B/P \cdot \Delta V/V$, где $B = -\partial P/\partial V$ – объемный модуль сжатия. Поэтому для получения наибольшей точности следует выбирать вещества с наибольшей сжимаемостью (малым B) и известным с наибольшей точностью уравнением состояния в измеряемом диапазоне давлений. Поэтому в качестве эталона лучше всего при $P \leq 22$ кбар использовать цезий, при $P \leq 300$ – калий, а при $P \leq 1$ Мбар – нат-

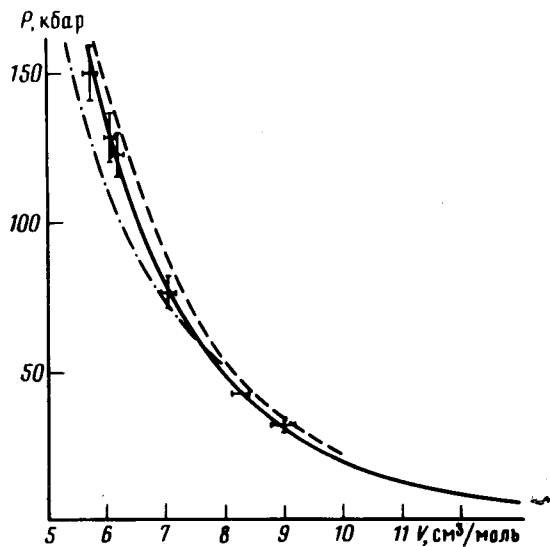


Рис.2. Экспериментальные точки настоящей работы (принято: $V_0 = 22,65$ см³/моль). Нулевые изотермы: непрерывная кривая – 8, пунктирная – 10, штрих-пунктирная – 11

рий, уравнения состояния которых вычислены в ⁶ с погрешностью, по-видимому, не превосходящей 3%. При больших давлениях точность уравнений состояний неопределенна и необходимо использовать вещества, уравнения состояния которых измерены в ударноволновых экспериментах.

Предположение о квазиизэнтропичности процесса, как уже отмечалось в ⁵, подтверждается численными расчетами; разница между средней расчетной и адиабатической температурами в предположении, что вязкость водорода достаточно мала, лежит в пределах погрешности расчетов. Вычисленная температура $T < 100$ К; поэтому, во-первых, водород еще остается твердым и во-вторых, тепловое давление $P_T \ll P_x$, так что нулевая изотерма в пределах погрешности измерений совпадает с адиабатой. Расчеты также показывают, что внутренняя поверхность алюминиевой трубки не нагревается текущим по ней током.

Результаты экспериментов представлены на рис.2. Экспериментальные точки получены при давлениях 150, 129, 123, 77 и 32 кбар с максимальной расчетной погрешностью $\Delta P/P = 6\%$ и $\Delta V/V = 2\%$ без учета погрешности уравнения состояния калия. Одна точка получена при использовании цезия в качестве эталонного вещества. Цезий обладает фазовыми переходами Cs II – III при $P = 42,2$ кбар и Cs III – IV при $P = 42,7$ кбар ⁷, которые происходят с большим суммарным изменением объема $\Delta V/V = 12\%$. Выбирая параметры: ток и момент регистрации, можно было измерить давление, когда происходят эти переходы. Тогда, очевидно, что ошибка в измерении давления $\Delta P = 0,5$ кбар (без учета температурной зависимости давления перехода).

Полученные экспериментальные точки с погрешностью $\sim 1\%$ „ложатся” на уравнение состояния водорода, полученное в ⁸ интерполяцией результатов ⁹ с учетом асимптотики при малых V . На рис.2 также показаны экспериментальные зависимости $P(V)$, полученные в ^{10, 11}. Расхождение между результатами ^{10, 11} и нашими довольно значительно и лежит за пределами декларируемой точности.

Литература

1. Григорьев Ф.В., Кормер С.Б., Михайлова О.Л., Толочко А.П., Урлин В.Д. ЖЭТФ, 1978, 75, 1682.
2. Hawke R.S. e. a. Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 994.
3. Прут В.В. Об измерении адиабатического уравнения состояния. Препринт 3255/9. М.: ИАЭ, 1980.
4. Ross M., Shishkevich C. Molekular and Metallic Hydrogen, R-2056-ARPA, Rand, Corp., Calif., 1977.
5. Прут В.В., Храбров В.А., Матвеев В.В., Шибанов С.А. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 33.
6. Вакс В.Г., Кравчук С.П., Трефилов А.В. ФТТ, 1977, 19, 1271.
7. Евдокимова В.В. УФН. 1966, 88, 93.
8. Прут В.В. Об интерполяции уравнения состояния водорода. Препринт 3026, М.: ИАЭ, 1978.
9. Anderson M.S., Swenson C.A. Phys. Rev., 1974, B10, 5184.
10. Van Straaten J., Wijngaarden R.J., Silvera J.F. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 97.
11. Shimizu H., Brody E.M., Mao H.K., Bell P.M. Phys. Rev. Lett., 1981, 47, 128.