

*Письма в ЖЭТФ, том 16, вып. 5, стр. 286 – 290.*                    5 сентября 1972 г.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЖИМАЕМОСТИ ВОДОРОДА  
ПРИ ПЛОТНОСТЯХ  $0,5 \pm 2 \text{ г/см}^3$ .  
МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ВОДОРОДА**

*Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер, О. Л. Михайлова,  
А. П. Толочкино, В. Д. Урлин*

Интерес к уравнению состояния водорода связан с тем, что он является основной составляющей некоторых планет и большинства звезд.

Кроме того, при высоких давлениях возможен его переход в металлическое – сверхпроводящее состояние.

Теоретическому рассмотрению уравнения состояния водорода посвящено большое количество работ [ 1 – 7 ]. Все они предсказывают существование в твердом водороде ( при  $T = 0^{\circ}\text{K}$  ) перехода из молекулярной модификации в атомарную при плотностях порядка  $0,5 \div 1 \text{ г}/\text{см}^3$ . В этой области плотностей энергетически более выгодно состояние, при котором молекулы разорваны, и водород становится одновалентным металлом. Давление фазового перехода в теоретических оценках колеблется в диапазоне  $0,25 \div 18 \text{ Мбар}$ .

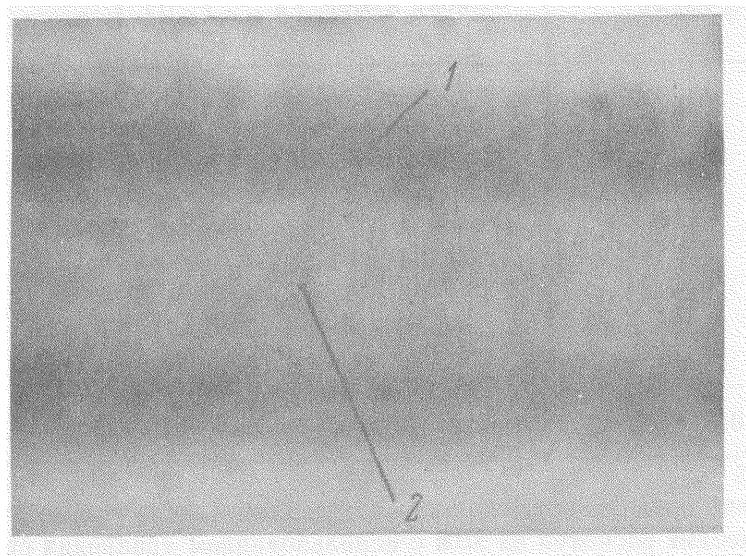


Рис. 1. Экспериментальная гаммаграмма: 1 – металлическая оболочка, 2 – полость со сжатым водородом

Экспериментальных работ по исследованию сжимаемости водорода известно мало. Стюартом [ 8 ] была измерена изотерма твердого молекулярного водорода при  $T = 4^{\circ}\text{K}$  до давлений  $P = 20 \text{ кбар}$ . Миллс и Грилли [ 9 ] экспериментально определили его кривую плавления до  $T = 60^{\circ}\text{K}$  и  $P = 3,5 \text{ кбар}$ . Ван Тил и Алдер [ 10 ] в экспериментах по ударному сжатию жидкого водорода ( $\rho_0 = 0,071 \text{ г}/\text{см}^3$ ) достигли плотности  $0,19 \text{ г}/\text{см}^3$  при давлении  $39,5 \text{ кбар}$ .

В настоящей работе гаммаграфическим методом измерена плотность водорода при его изэнтропическом сжатии цилиндрической оболочкой в области давлений от  $0,4$  до  $8 \text{ Мбар}$ . С этой целью применялся цилиндрический заряд взрывчатого вещества ( ВВ ), под действием продуктов которого разгонялась оболочка, сжимающая газообразный водород до высоких плотностей и давлений. Устройства подобного типа описаны в [ 11 – 14 ]. Для регистрации диаметра полости со сжатым водородом применялась мощная просвечивающая гаммагра-

физическая установка с малым временем экспозиции, типа, описанной в [ 15 ]. Характерная гаммограмма полости оболочки в один из моментов сжатия водорода приведена на рис. 1. Измеряя диаметр полости со сжатым газом в процессе схождения оболочки к оси, можно определить плотность водорода. Варьируя начальное давление газа и параметры заряда, можно определить сжимаемость водорода в достаточно широком диапазоне плотностей. Полученные экспериментальные результаты приведены в таблице.

### Экспериментальные данные

№ п / п	$\rho, \text{г/см}^3$	Ошибка измер. $\Delta \rho / \rho, \%$	$\delta = \rho / \rho_k^{1)}$	$P, \text{Мбар}$
1	0,45	12	5,1	0,37
2	0,98	17	11,0	2,63
3	1,15	18	12,9	3,24
4	1,40	21	15,7	4,40
5	1,95	40	21,9	8,00

<sup>1)</sup>  $\rho_k = 0,089 \text{ г/см}^3$  – плотность  $H_2$  при  $T = 0$  и  $P = 1 \text{ бар}$ .

В таблице приведены также значения давлений, полученные из газодинамических расчетов на ЭВМ с использованием уравнения состояния водорода, найденного описанным ниже методом.

На базе полученных в настоящей работе и ранее известных экспериментальных данных были найдены уравнения состояния твердой и жидкой фаз молекулярного водорода. Форма и методы отыскания параметров уравнения состояния были приняты аналогичными работам [ 16 – 18 ].

Результаты расчета изэнтропы, соответствующей эксперименту, изэнтропы при абсолютном нуле ( $\rho_x(\rho)$ ), найденной с выделением вклада нулевых колебаний, кривой плавления и ударной адиабаты из начального состояния с  $\rho_0 = 0,071 \text{ г/см}^3$  показаны на рис. 2. Из этого рисунка видно, что расчетные изэнтропы и ударная адиабата вполне удовлетворительно совпадают с экспериментальными. Такое же согласие имеет расчетная кривая плавления во всей экспериментально обследованной области.

Обратим внимание на то, что согласно эксперименту, водород при  $P \approx 0,4 \text{ Мбар}$  имеет плотность  $0,45 \text{ г/см}^3$ , что примерно в 1,8 раза больше по сравнению с расчетом Абрикосова [ 3 ] для молекулярной фазы и достаточно близко к расчету Трубицына [ 6 ]. Это и естественно, так как в работе [ 3 ] не учитывались члены притяжения в давлении.

Различие расчетной изэнтропы молекулярной фазы при  $P > 2,8 \text{ Мбар}$  (пунктирная кривая на рис. 2) с экспериментом говорит о наличии ано-

малии в свойствах водорода в этой области давлений. Эту аномалию можно отождествить с проявлением перехода водорода в металлическое состояние.

Все имеющиеся экспериментальные данные удается удовлетворительно описать, предположив, что переход в металлическую модификацию водорода в твердом состоянии происходит при давлении  $P \approx 2,8 \text{ Мбар}$  со скачком плотности от  $1,08$  до  $1,3 \text{ г/см}^3$ .

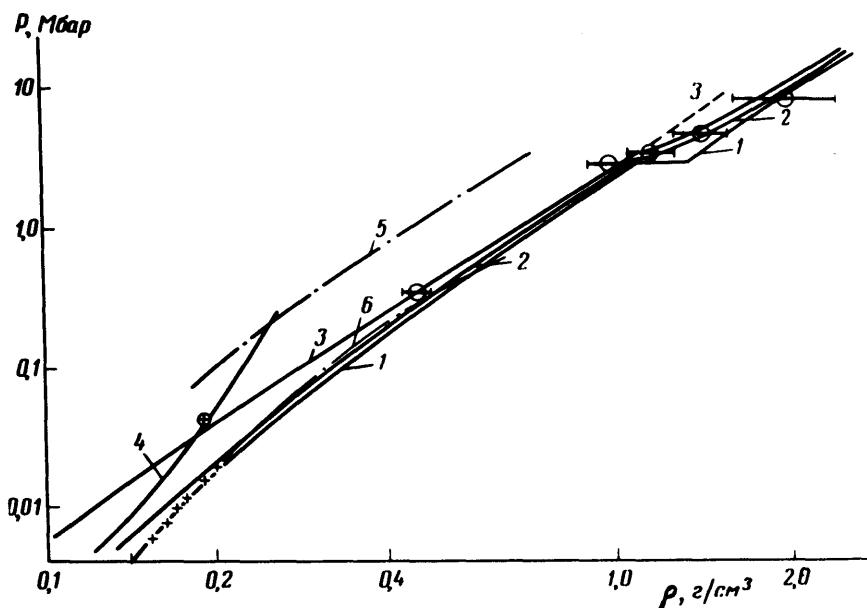


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости для водорода:  $\square$  — экспериментальные результаты настоящей работы,  $+$  — экспериментальная изотерма Стюарта при  $T = 4^0\text{K}$  [8],  $\bullet$  — эксперимент по ударному сжатию [10],  $P(\rho)$  — нулевая изотерма (1), кривая плавления (2), изэнтропа (3), ударная адиабата (4), рассчитанные в настоящей работе, (5) —  $P_x(\rho)$  по Абрикосову [3], (6) —  $P_x(\rho)$  по Трубицыну [6].

При этом кривая упругого взаимодействия  $P_x(\rho)$  для атомарного водорода совпадает с расчетными нулевыми изотермами различных авторов при  $P > 30 \text{ Мбар}$  [3,5], несколько отличаясь от них в области меньших давлений.

Расчет температуры на изэнтропе и кривой плавления при давлениях  $\sim 3 \text{ Мбар}$  показывает, что аномалия имеет место в жидкой фазе. В предположении, что переход происходит с нулевым скачком энтропии, кривая фазового равновесия пересекает кривую плавления при  $T \approx 700^0\text{K}$ . Так как температура на изэнтропе при этих давлениях составляет по расчету  $\sim 7000^0\text{K}$ , отождествить излом на экспериментальной изэнтропе с затвердеванием водорода при сжатии, по-видимому, нельзя.

Отметим, что расчеты изэнтропы и кривой плавления при  $P > 2,8 \text{ Мбар}$  были выполнены в предположении существования двух жидких фаз водорода, между которыми существует фазовый переход второго рода<sup>1)</sup>.

Расчетные изэнтропы и кривая плавления, вычисленные по найденным уравнениям состояния, показаны на рис. 2.

Поступила в редакцию  
31 июля 1972 г.

### Литература

- [ 1 ] E.Wigner, H.B.Huntington. J. Chem. Phys., 3, 764, 1935.
- [ 2 ] R.Kronig, J. de Bour, J.Korringa, Phys., 12, 245, 1946.
- [ 3 ] А.А.Абрикосов. Астрономический журнал, 31, 112, 1954.
- [ 3 ] Б.И.Давыдов. Труды геофиз. ин-та АН СССР, № 26, 86, 1955.
- [ 4 ] W.Carr. Phys. Rev., 128, 120, 1962; 131, 1947, 1963.
- [ 5 ] В.Т.Трубицын. ФТТ, 7, 3363, 3443, 1965; 8, 862, 1966.
- [ 7 ] T.Schneider. Helv. Phys. Acta., 42, 957, 1969.
- [ 8 ] J.W. Stewart. Phys. Rev., 97, 578, 1955; Phys. Chem. Solids., 1, 146, 1956.
- [ 9 ] R.L.Mills, E.R.Grilly. Phys. Rev., 101, 1246, 1956.
- [ 10 ] M.van Thiel, B.J.Alder. Molec. Phys., 10, 427, 1966.
- [ 11 ] Electronics. 37, № 3, 1964.
- [ 12 ] C.Anderholm. Bull. Amer. Phys. Soc., 12, № 6, 1967.
- [ 13 ] Патент ФРГ № 1240194, патент ФРГ № 1248179, патент США № 311055, патент США № 3235816.
- [ 14 ] А.Д.Сахаров. УФН IV, 88, 4, стр. 725, 1966 г.
- [ 15 ] А.И.Павловский, Г.Д.Кулемов, Г.В.Склизков, Ю.А.Зысин, А.И. Герасимов. ДАН СССР, 160, 68, 1965.
- [ 16 ] С.Б.Кормер, А.И.Фунтиков, В.Д.Урлин, А.И.Колесникова. ЖЭТФ, 42, 687, 1962.
- [ 17 ] С.Б.Кормер, М.В.Синицын, Г.А.Кириллов, В.Д.Урлин. ЖЭТФ, 48, 1033, 1965.
- [ 18 ] В.Д.Урлин. ЖЭТФ, 49, 485, 1965.
- [ 19 ] С.Б.Кормер, М.В.Синицын, А.И.Фунтиков, В.Д.Урлин, А.В.Блинов. ЖЭТФ, 47, 1202, 1964.

<sup>1)</sup> Аналогичная аномалия имеет место в жидком NaCl при его ударном сжатии [ 19 ].