

## Экспериментальное определение условий перехода в проводящее состояние атмосферы Юпитера

В. Я. Терновой<sup>1)</sup>, С. В. Квитов, А. А. Пяллинг, А. С. Филимонов, В. Е. Фортон

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 2003 г.

Выполнены эксперименты по одновременному измерению интенсивности оптического излучения и сопротивления слоя водородно-гелиевой смеси с массовым содержанием гелия  $Y \cong 0.24$  ( $Y = m_{\text{He}}/(m_{\text{He}} + m_{\text{H}})$ ), соответствующей составу внешних слоев атмосферы Юпитера [2], при ее многократном ударном сжатии в плоской геометрии до 164 ГПа. Начальное давление смеси было выбрано 8 МПа, что при начальной температуре смеси – 77.4 К и скорости стальных ударников 6.2 км/с позволило на конечных стадиях сжатия генерировать состояния, близкие к состояниям адиабаты атмосферы Юпитера по моделям [2, 3]. Определены условия появления проводящей фазы в процессе сжатия и уровень достигаемой электрической проводимости. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами одномерного гидродинамического моделирования процесса сжатия с использованием уравнения состояния смеси в рамках модели, аналога предложенной в [3, 8], а также с поведением чистых компонент смеси, имеющих равную со смесью начальную плотность при сжатии до одинаковых конечных давлений.

PACS: 52.25.–b

Полученные зондом “Галилео” данные о строении и составе внешних слоев атмосферы Юпитера до 1 МПа и 200 К [1] подтвердили справедливость адиабатического приближения [2, 3] для описания зависимости ее температуры от давления при  $P > 0.1$  МПа. Измеренное содержание гелия в атмосфере оказалось близким к его содержанию внутри Солнца –  $Y \cong 0.234 \pm 0.005$  ( $Y = m_{\text{He}}/(m_{\text{He}} + m_{\text{H}})$ ). В ближайшее время трудно ожидать расширения диапазона исследованных давлений с помощью космических аппаратов. Поэтому остается открытым вопрос об определении физических условий перехода ее в проводящее состояние.

Существующие в настоящее время модели атмосферы Юпитера основываются на предположении о локализации перехода водорода в ней в проводящее состояние при 150 ГПа [2] и 100 ГПа [3].

Результаты динамических экспериментов по сильному однократному, и многократному сжатию исходно жидкого и газообразного водорода [4–6] позволили установить давление перехода его в проводящее состояние при уровне давления 40–140 ГПа и плотности 0.4–0.7 г/см<sup>3</sup>, указывая на существенное влияние температуры на этот процесс. Рассмотрение данного перехода атмосферы Юпитера без учета наличия в ней гелия, выполненное в [4, 2], завышает значение давления перехода, так как гелий служит источником дополнительного тепла в смеси

относительно чистого водорода при рассмотрении адиабатического сжатия.

Экспериментальное изучение условий “ионизации давлением” гелия при многократном ударном сжатии [7] показало, что при температурах 15–40 кК, реализуемых в выполненных экспериментах, он переходит в проводящее состояние при плотности выше 0.7 г/см<sup>3</sup>. Данное обстоятельство позволяет предположить, что поведение атмосферы Юпитера при меньших плотностях и более низких температурах будет определяться в первую очередь водородом при учете дополнительного разогрева смеси относительно чистого водорода присутствующим гелием. Как показывают расчеты [5, 7], многократное ударное сжатие является изоэнтропическим в пределах ошибки эксперимента при прохождении по сжимаемому слою третьей и последующих ударных волн. При этом в сжимаемом слое реализуются максимум два дискретных состояния вещества, а в моменты отражения от границ слоя – одно. Переведа исходную смесь после действия двух прошедших волн в состояние, находящееся на изоэнтропе Юпитера можно провести диагностику поведения при более высоких дискретных параметрах сжатия.

В предлагаемом сообщении представлены результаты экспериментов по изучению перехода в проводящее состояние водородно-гелиевой смеси с близким по составу к измеренному “Галилеем” значением  $Y = 0.245 \pm 0.015$  (смесь в состоянии поставки, производство фирмы “АГА-БКЗ”) при многократном

<sup>1)</sup>e-mail: ternovoi@icp.ac.ru

ударно-волновом сжатии в плоской геометрии до давления 130–160 ГПа. На  $P$ – $T$ -диаграмме, показанной на рис.1, приведены результаты термодинамическо-

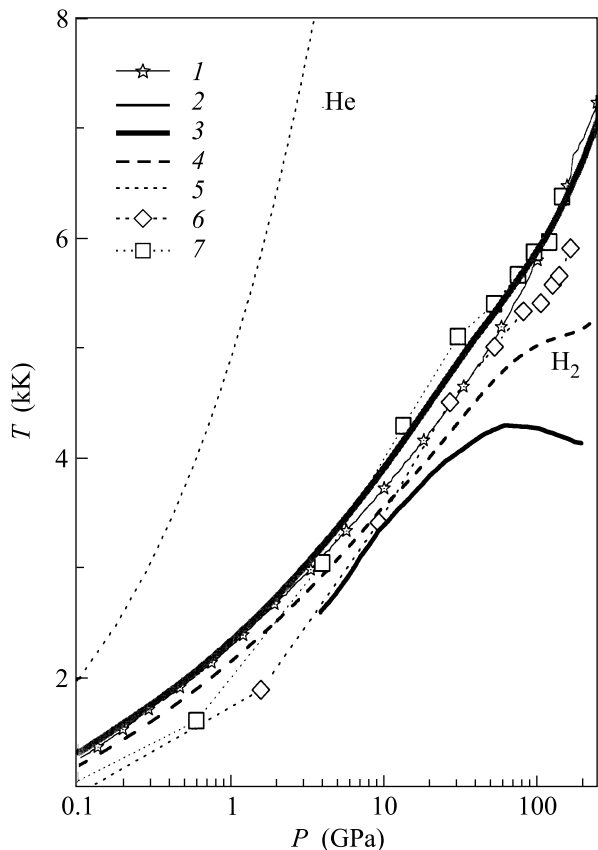


Рис.1.  $P$ – $T$ -диаграмма адиабаты атмосферы Юпитера и адиабат водорода и гелия, стартующих с уровня давления и температуры соответственно 0.1 МПа и 165 К. 1, 2, 3 – расчет адиабаты согласно [3, 4] и данной работы соответственно; 4, 5 – адиабаты водорода и гелия; 6, 7 – траектории состояний многократного ударного сжатия

го моделирования поведения атмосферы Юпитера, гелия и водорода согласно [3, 4] совместно с данными расчетов траекторий многократного ударного сжатия выполненных экспериментов.

Уравнение состояния смеси, использованное при гидродинамическом моделировании, строилось аналогично [8]. Потенциал взаимодействия атомов водорода и гелия был взят из работ [8, 9]. Потенциал взаимодействия  $H_2$ -He был определен экспериментально в работе [10]. Параметры потенциала взаимодействия  $H_2$ -He брались согласно работе [11] как средние от параметров взаимодействия  $H_2$ - $H_2$  и He-He. Потен-

циалы взаимодействия брались в модифицированной относительно стандартного (exp-6 потенциал) виде:

$$V(r) = \begin{cases} \frac{\epsilon}{\alpha - 6} \left[ 6e^{\alpha(1 - \frac{r}{r_a})} - \theta\alpha \left(\frac{r_a}{r}\right)^6 \right], & r > W, \\ Ae^{-Br}, & r \leq W. \end{cases}$$

В отличие от стандартного exp-6 потенциала, здесь введен параметр  $\theta$ . Он нужен, так как для гелия потенциал взаимодействия строится без учета дальнего действующего притяжения. Используемые в данной работе параметры потенциала взаимодействия приведены в табл.1.

Таблица 1

		$\alpha$	$r_a$ (Å)	$W$ (Å)	$\theta$
$H_2$ -He	24.53	11.05	3.19865	1.137827	0.5
He-He	16.53	11	2.9673	0	0
$H_2$ - $H_2$	36.4	11.1	3.43	1.4.5855	1

Расчет потенциалов взаимодействия и их сравнение с экспериментальными данными приведены на рис.2.

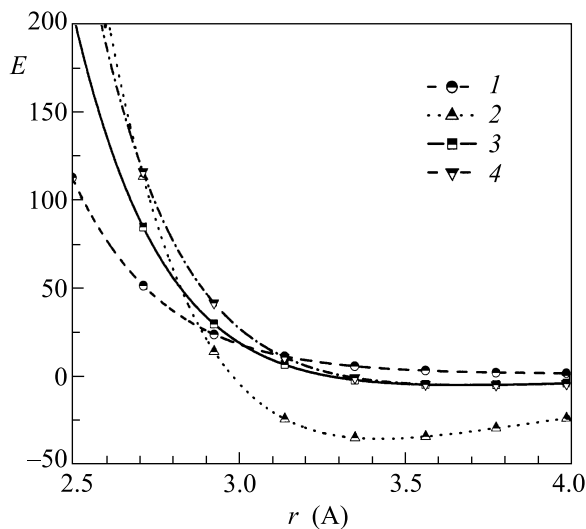


Рис.2. Эффективные парные потенциалы взаимодействия: 1 – He-He, 2 –  $H_2$ - $H_2$ , 3 –  $H_2$ -He, 4 –  $H_2$ -He-взаимодействия согласно [10]

Учет диссоциации атомов водорода проводился согласно модели предложенной в работе [12] по формуле

$$E_{dis}(V) = a_0 - a_1(V - V_0)^2 - a_2(V - V_0)^3, \quad V < V_0,$$

$$E_{dis}(V) = a_0, \quad v > V_0.$$

Исходя из известных холодных кривых молекулярного и атомарного водорода снижение потенциала

ионизации от плотности можно описать параметрами  $a_0 = 4.735$ ,  $a_1 = 0.013$ ,  $a_2 = 0.00732$ ,  $V_0 = 11.13055$  ( $\text{см}^3/\text{моль}$ ). При расчете степени диссоциации водорода в смеси считалось, что потенциал диссоциации зависит не от плотности, а от среднего количества атомов в единице объема.

На рис.1 видно хорошее согласие определенной энтропии Юпитера с данными аналогичных расчетов Хаббарда [13] и отсутствие понижения температуры в процессе диссоциации при расчетах согласно [4].

Постановка эксперимента по одновременной регистрации параметров сжатия и сопротивления сжимаемого слоя была аналогична описанной в [7]. Для генерации процесса сжатия пластины стали 12X18H10T толщиной 1.5 мм и диаметром 30 мм ускорялись до скоростей 5.6 км/с продуктами детонации цилиндрических зарядов конденсированных взрывчатых веществ в процессе торцевого метания. Для достижения скорости 6.2 км/с стальной пластины толщиной 1.5 мм продуктами детонации разгоняли стальную пластину толщиной 4.5 мм и диаметром 40 мм до скорости 4.7 км/с и перед тонкой стальной пластиной располагали слой ПММА толщиной 6 мм. Начальная температура смеси контролировалась платиновым термометром сопротивления и была с точностью 2 градуса равной температуре использованного для охлаждения жидкого азота – 77.4 К, а начальное давление было выбрано на основании предварительного одномерного гидродинамического моделирования эксперимента 4 и 5.6 МПа при малой скорости пластины и 8.1 МПа – при большой. Для регистрации сопротивления использовались схемы с одним и двумя измерительными электродами [14, 7]. В сапфировом диске оптического качества (производство завода синтетических корундов “Монокристалл”, г. Ставрополь) диаметром 20 мм и толщиной около 5 мм в вершинах равностороннего треугольника со стороной 3.8 мм сверлились отверстия диаметром 0.45–0.8 мм, заполняемые индием. Измерительные электроды располагались на оси диска. Диафрагмируемый кварц-кварцевый световод диаметром 0.4 мм располагался на внешней стороне сапфирового окна между электродами примерно в 2–3 мм от их оси. В индиевый земляной электрод диаметром 0.8 мм была вдавлена стальная посеребренная проволока диаметром 0.3 мм, которая выступала на 1.2 мм относительно внутренней плоскости сапфира. Такая конструкция измерительной ячейки позволила уменьшить ее индуктивность до 5–10 нГн.

На рис.3 приведены экспериментальные записи регистрации сопротивления сжимаемого слоя, уровня проводимости и яркостной температуры при скорости ударника – 6.2 км/с и измерительной схемы

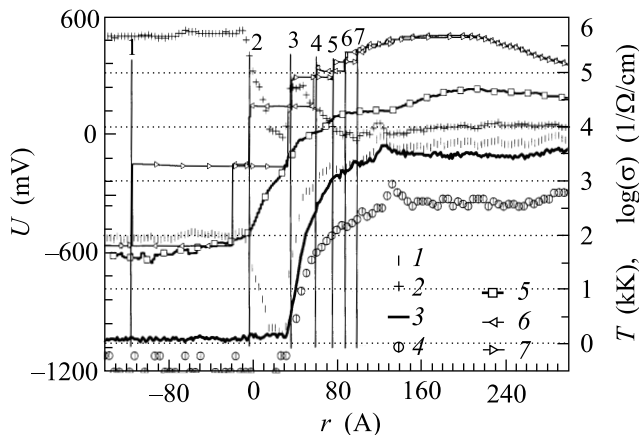


Рис.3. Сравнение экспериментальной записи и результатов моделирования для эксперимента со смесью ( $m_{\text{He}}/m_{\text{H}_2} = 0.24$ ): 1, 2 – напряжение на электродах, 3 – результирующее напряжение на образце, 4 – пересчет проводимости смеси (правая ось), 5 – экспериментально зарегистрированная температура (правая ось), 6, 7 – расчет температуры смеси в первой и последней ячейках (правая ось)

с тремя электродами. Линиями отмечены моменты отражения ударных волн от границ слоя. Регистрируемая температура сопоставлена с результатами расчета температур генерируемых состояний по одномерному гидродинамическому коду с использованием разработанного уравнения состояния смеси. На сжимаемый слой бралось 200 ячеек. Показанный временной ход температуры для 10- и 190-й точек сжимаемого слоя позволяет установить хорошее согласие наблюдаемых и рассчитанных моментов отражения ударных волн от границ слоя. Расчетные параметры состояний за ударными волнами приведены в табл.2.

Используя три электрода для измерения сопротивления сжимаемого слоя, удалось не только определить уровень конечной проводимости ( $\Sigma$ ) смеси при высоких давлениях, но и установить положение границы перехода атмосферы в проводящее состояние на основе одних электрических измерений. Уже после третьей ударной волны была зарегистрирована проводимость на уровне 0.41 Ом/см ( $P = 26.5$  ГПа,  $\rho = 0.365$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 4380$  К, рис.3). После прохождения четвертой волны проводимость возрастает на 2 порядка до 55 1/Ом/см ( $P = 51.7$  ГПа,  $\rho = 0.494$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 4940$  К). Учет влияния индуктивности увеличивает этот уровень в три раза. Даль-

Таблица 2

№ п/п	0	1	2	3	4	5	6	7	12
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0.0291	0.110	0.23	0.365	0.494	0.603	0.68	0.737	0.831
$P$ , ГПа	0.0081	1.57	9.03	26.5	51.7	80	104.4	124.6	164
$T$ , К	77.4	1845	3320	4380	4940	5020	5205	5380	5690
$U$ , мВ	1025.2			1013	336.9	208.9	168.9	128.9	104.9
$R$ , Ом				43	0.254	0.133	0.102	0.0756	0.059
$L$ , мм	4.938			0.394	0.291	0.238	0.211	0.195	0.173
$\rho$ , Ом·см				2.577	0.018	0.010	0.0084	0.0063	0.0052
$\Sigma$ , 1/Ом/см				0.388	55.05	96.87	118.9	158.5	194

нейшее сжатие до 0.8 г/см<sup>3</sup> приводит лишь к двухкратному увеличению уровня проводимости.

Таким образом, результаты выполненных измерений позволяют утверждать, что переход атмосферы Юпитера в проводящее состояние происходит при давлениях 25–50 ГПа. Это согласуется с ранее определенной границей перехода в проводящее состояние исходно газообразного водорода при многократном ударном сжатии [5]. В дальнейшем планируется расширить диапазон исходных плотностей смеси и скоростей подлетающих ударников для более точного определения  $\Sigma - p$ -зависимости на изоэнтропе Юпитера.

Авторы выражают признательность Н. А. Афанасьеву и А. В. Терновому за изготовление экспериментальных устройств и участие в проведении экспериментов. Работа была частично финансирована в рамках комплексной программы научных исследований Президиума РАН “Теплофизика и механика высокоэнергетических воздействий”, грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 03-02-16998 и грантом Президента РФ на поддержку молодых российских ученых и ведущих научных школ на выполнение научных исследований # НШ-1938.2003.2

1. U. Von Zahn, D. M. Hunten, and G. Lehmacher, *J. Geophys. Res.* **103**, 22815 (1998).

2. T. V. Gudkova and V. N. Zharkov, *Planetary and Space Science* **47**, 1201 (1999).  
 3. D. Saumon, G. Chabrier, H. M. Van Horn, *J. Suppl. Ser.* **99**, 713 (1995).  
 4. W. J. Nellis, *Planetary and Space Science* **48**, 671 (2000); S. T. Weir, A. C. Mitchell, and W. J. Nellis, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1860 (1996).  
 5. В. Е. Фортов, В. Я. Терновой, С. В. Квитов и др., *Письма в ЖЭТФ* **69**, 874 (1999); V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov et al, *Physica* **B265**, 6 (1999).  
 6. G. W. Collins, P. M. Celliers, D. M. Gold D.M. et al., *Contrib. Plasma Phys.* **39**, 13 (1999).  
 7. В. Е. Фортов, В. Я. Терновой, М. В. Жерноклетов и др., *ЖЭТФ* **124**, 288 (2003).  
 8. H. Juranek and R. Redmer, *J. Chem. Phys.* **112**, 3780 (2000).  
 9. W. J. Nellis, N. C. Holmes, A. C. Mitchell et al., *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1248 (1984).  
 10. R. Gengenbach, J. Strunck, and J. Toennies. *J. Chem. Phys.* **54**, 1830 (1971).  
 11. F. H. Ree, *Shock waves in condensed matter*, 1987, Eds. S. C. Schmidt and N. C. Holmes, Elsevier Science Publishers B.V, 1988, p. 125–130.  
 12. M. Ross, *J. Chem. Phys.* **86**, 7110 (1987).  
 13. W. B. Hubbard, T. Guillot, M. S. Marley et al., *Planetary and Space Science* **47**, 1175 (1999).  
 14. A. C. Mitchell and R. N. Keeler, *Rev. Sci. Instr.* **40**, 632 (1969).