

03

© 1990

## О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ - ПЛАЗМА В ВОДОРОДЕ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

И.В. Соколов, Е.Л. Тарасова

Предложена схема эксперимента по сжатию конденсированного водорода двумя цилиндрическими лайнерами. Расчет указывает на возможность перехода водорода в жидкометаллическую фазу.

Одним из фундаментальных вопросов физики является проблема металлического водорода [1]. В связи с этим исследуется поведение водорода при высоком давлении [2-6]. В [7] показано, что переход водорода из диэлектрического состояния (точнее, из состояния с малой проводимостью) в проводящее теоретически возможен не только в твердой, но и в жидкой фазе и определены параметры перехода.

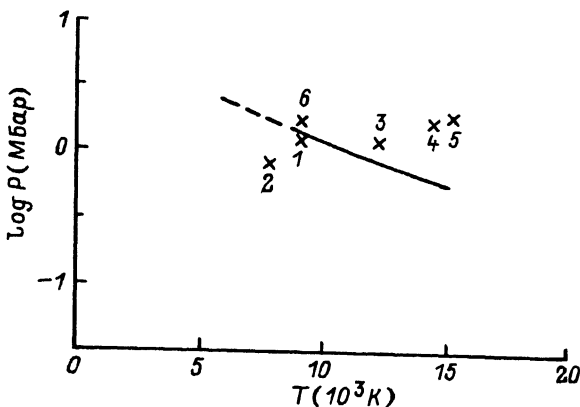
В работе предлагается схема эксперимента для реализации значений давления и плотности  $\rho \approx 2$  МБар,  $\rho \approx 0.8$  г/см<sup>3</sup> (ограничение на температуру  $T < 15000$  К), при которых возможен данный переход.

Плоская ударная волна (УВ) и сходящаяся цилиндрическая УВ не дают требуемых значений  $\rho$ . В эксперименте со сферической сходящейся УВ трудно зафиксировать фазовый переход. Поэтому здесь рассмотрено взаимодействие двух встречных цилиндрических УВ, позволяющее осуществить более высокую степень сжатия по сравнению с обычным способом, использующим цилиндрические УВ. Наши расчеты для идеального газа показали, что при этом взаимодействии достигается такое же высокое уплотнение, как и для сферических сходящихся УВ.

Предлагается использовать два цилиндрических лайнера: сжимающийся и расширяющийся. Внутренняя оболочка может быть разогнана до скорости  $u_1 \approx 5$  км/с [9]. Скорость внешнего лайнера  $u_2 \leq (5-10)$  км/с. Между лайнерами находится водород с плотностью  $\rho_k = 133.5$  кг/м<sup>3</sup>, соответствующей твердому состоянию при  $\rho = 0$ ,  $T = 0$ . При сжатии внешнего поршня образуется сходящаяся УВ. В момент прихода волны на внутренний лайнер последний начинает расширяться, и волна отражается от движущегося поршня, что и приводит к высоким значениям  $\rho$  и  $\rho$ .

Численно решались гидродинамические уравнения с эмпирическим уравнением состояния жидкого молекулярного водорода [10]

$$(\delta = \rho/\rho_k):$$



$$p = P_x(\rho) + 3RT\rho \frac{\gamma + z/3}{1+z} + 3R\rho T_0 (\mathcal{S}/\mathcal{S}_0)^r,$$

$$E = E_x(\rho) + 3RT \frac{1+z/2}{1+z} + 3RT_0 (c + a[(\mathcal{S}/\mathcal{S}_0)^r - 1]/x), \quad (1)$$

используемые константы:  $r = 1$ ,  $\mathcal{S}_0 = 0.579$ ,  $c = 1.2593$ ,  $a = 9.247$ ,  $T_0 = 14$  К,  $R = 4.155 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К). Функции аппроксимировались следующим образом:

$$\gamma = 1.2, \quad z = 21RT/D_0,$$

$$P_x = \begin{cases} 0 & \mathcal{S} < 2 \\ 6 \cdot 10^9 (\mathcal{S} - 2)^2, & \mathcal{S} \geq 2 \text{ (Па)} \end{cases}$$

$$E_x = \begin{cases} 1.02 \cdot 10^7, & \mathcal{S} \geq 2 \\ 4.5 \cdot 10^7 (\mathcal{S} - 4 \cdot \ln \mathcal{S} - 4/\mathcal{S} + 3), & \mathcal{S} \geq 2 \text{ (Дж/кг)} \end{cases}$$

$$D_0 = \begin{cases} (3.75 \cdot \mathcal{S} - 3.25) \cdot 10^7, & \mathcal{S} < 3 \\ 6 \cdot 10^7 \frac{(\mathcal{S} - 2)(\mathcal{S} + 1)}{\mathcal{S}}, & \mathcal{S} \geq 3 \text{ (Дж/кг)}. \end{cases}$$

Начальные радиусы лайнеров  $R_0 = 1$  и  $r_0 = 0.1$ . При различных  $U_1$  и  $U_2$  рассчитаны параметры в момент отражения УВ от внутреннего лайнера для: 1)  $U_1 = U_2 = 4$  км/с; 2)  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 4$  км/с; 3)  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 5$  км/с; 4)  $U_1 = 4$ ,  $U_2 = 5$  км/с; 5)  $U_1 = U_2 = 5$  км/с; 6)  $U_1 = U_2 = 5$  км/с. В варианте 6 внутренний лайнер начинает расширяться до прихода на него ударной волны от внешнего лайнера.

На рисунке представлена кривая фазового перехода жидкого водорода в ионизованное состояние [7] и нанесены расчетные точки. Как видно из рисунка, варьируя два параметра ( $U_1$  и  $U_2$ ), можно получить всю последовательность состояний вдоль фазовой кривой. Точки, лежащие выше кривой, не имеют непосредственного физического смысла (выше кривой уравнение состояния (1) не-

применимо) и лишь демонстрируют возможность превышения параметров фазового перехода.

Расчеты показывают реальность получения в данной геометрии высоких значений давления и плотности. Пространственный масштаб, на котором достигаются экстремально высокие значения параметров, не слишком мал ( $\approx 10\%$  от начального радиуса внешнего лайнера), что позволяет надеяться на возможность измерения проводимости или высокочастотного коэффициента отражения. Соответствующий эксперимент позволил бы доказать существование и исследовать характеристики фазового перехода жидкость - неидеальная плазма при высоком давлении.

Благодарим С.В. Буланова и И.А. Коссого за полезные обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г и н з б у р г В.Л. // УФН, 1969, Т. 97, № 4, С. 601-619.
- [2] S c h n e i d e r Т. // Helv. Phys.Acta, 1969, V. 42, P. 957-989.
- [3] S h a p l i n e G.F. // Phys. Rev. 1972, V. B6, P. 2067-2070.
- [4] К а г а н Ю.М., П у ш к а р е в В.В., Х о л а с А. // ЖЭТФ. 1977, Т. 73, № 3, С. 967-987.
- [5] H a w k e P.S., B u r g e s s T.G., D u e r r e D.E. // Phys. Rev. Lett. 1978, V. 41, P.994-997.
- [6] Г р и г о р ь е в Ф.В., К о р м е р С.Б., М и х а й л о в а О.Л. и др. // ЖЭТФ. 1978, Т. 75, № 5, С. 1683-1693.
- [7] S a u m o n D., S h a b r i e r G. // Phys. Rev. Lett. 1989, V. 62, P. 2397-2400.
- [8] Л а н д а у Л.Д., Л и ф ш и ц В.М. Гидродинамика, М.: Наука, 1978. 740 с.
- [9] Б а у м Ф.А., О р л е н к о Л.П., С т а н ю к о в и ч К.П. и др. // Физика взрыва, М.: Наука, 1975. 704 с.
- [10] Г р и г о р ь е в Ф.В., К о р м е р С.Б., М и х а й л о в а О.Л. и др. // ЖЭТФ. 1975, Т. 69, № 2, С. 743-749.

Поступило в Редакцию

25 марта 1990 г.