

*Письма в ЖЭТФ, том 15, вып 6, стр. 343–345*

*20 марта 1978 г.*

## **МОЖЕТ ЛИ ЖИДКИЙ МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВОДОРОД НАХОДИТЬСЯ В СВЕРХТЕКУЧЕМ СОСТОЯНИИ ?**

*В. Л. Гинзбург, А. А. Собянин*

Любая бозе-жидкость должна, по-видимому, переходить в сверхтекучее состояние при некоторой температуре  $T_\lambda$ , если только она не затвердевает при более высокой температуре  $T_m > T_\lambda$ . Такое утверждение подтверждается на примере жидкого гелия (в этом случае при  $P < 25$  атм жидкость вообще не затвердевает) и не противоречит оцен-

кам для молекулярного водорода  $H_2$ . В самом деле, для идеального бозе-газа

$$T_{\lambda_0} = \frac{3,31 \hbar^2}{g^{2/3} M k} n^{2/3} \approx 112 \left( \frac{M}{M_p} \right)^{-5/3} \rho^{2/3}, \quad (1)$$

где  $M$  — масса атома (молекулы),  $M_p$  — масса протона,  $n$  — концентрация,  $\rho = Mn$  — плотность и при переходе к последнему выражению статвес  $g$  положен равным единице. Для He, согласно (1),  $T_{\lambda_0} \approx 3^\circ K$ , в то время, как  $T_\lambda = 2,17^\circ$ . Для  $H_2$ , согласно (1) с  $g = 1$  (параводород),  $T_{\lambda_0} \approx 6^\circ$ , в то время, как  $T_m = 14^\circ$  (в тройной точке  $T_m = 13,806^\circ K$ ).  
 $^\circ$  В силу сказанного можно думать, что жидкий  $H_2$  перейдет в сверхтекучее состояние, если только удастся задержать его затвердевание до температуры  $T \sim 6^\circ$ <sup>1)</sup>. Для этой цели можно пытаться использовать переохлаждение жидкого  $H_2$ , применять растяжение (т. е. создавать отрицательное давление) и исследовать пленки на различных подложках. Кроме того, на значение  $T_m$  влияет введение примесей (в первую очередь речь идет о He), появление вакансий и замена некоторых молекул  $H_2$  на атомы H (этого можно добиться нейтронным облучением)<sup>1)</sup>. Надежно оценить пределы снижения  $T_m$  мы не можем, но с целью привлечь внимание экспериментаторов к проблеме сверхтекучести  $H_2$  (точнее, речь в первую очередь может идти о наблюдении  $\lambda$ -перехода в метастабильном жидком водороде), сделаем еще несколько замечаний на этот счет.<sup>1</sup>

Поскольку жидкий  $H_2$  смачивает большинство поверхностей, переохлаждение может быть затруднено в связи с образованием слоя твердого  $H_2$  у стенки с последующим ростом этого слоя. Эту трудность можно надеяться обойти, в частности, при использовании твердых стенок из  $D_2$  ( $T_m = 18,7^\circ$ ) или Ne ( $T_m = 24,57^\circ$ ). Дело в том, что в случае  $D_2$  и Ne параметр  $\epsilon$  в фор-

<sup>1)</sup> Межмолекулярное взаимодействие часто описывают потенциалом Леннарда — Джонса

$$V(r) = 4\epsilon [(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6], \quad (2)$$

причем для He  $\epsilon = 10,2^\circ K$  и  $\sigma = 2,56 \text{ \AA}$ , а для  $H_2$   $\epsilon = 37^\circ K$  и  $\sigma = 2,92 \text{ \AA}$ . В работе [1] при использовании формулы (2) и экспериментальных данных о радиальной функции распределения для He было получено значение  $T_\lambda = 2,15^\circ$ . В случае  $H_2$  расчет по схеме [2] нами полностью проведен не был и вряд ли он был бы надежен, в частности, в связи с отсутствием нужных сведений о радиальной функции распределения при  $T \sim T_\lambda$ . Однако в качественном отношении из [2] ясно, что для  $H_2$  можно ожидать значения  $T_\lambda$  близкого к  $T_{\lambda_0}$  (и, в принципе, даже превосходящего  $T_{\lambda_0}$ ), поскольку  $T_\lambda$  возрастает с ростом  $\epsilon$ , а  $\epsilon(H_2) \gg \epsilon(He)$

<sup>2)</sup> Мы не касаемся здесь вопроса о возможности создать пленки (в частности, сверхтекучие) из атомарного водорода (см [3]).

муле (2) равен или несколько меньше, чем для  $H_2$ . Не исключено также применение каких-то других несмачиваемых веществ. К сожалению, грубые оценки свидетельствуют о том, что и при отсутствии зародышей на стенках переохлаждение  $H_2$  возможно лишь на  $2 - 3^\circ$  (для жидкой воды переохлаждение не превосходит  $40^\circ$ ). Отрицательное давление для воды на практике достигало  $280 \text{ атм}$  (см. [4]). Для  $H_2$  оценка отрицательного давления  $|P_{\text{max}}| \sim \epsilon / \sigma^3$  приводит к значению около  $200 \text{ атм}$ . Возможно эта оценка занижена, но даже достижение давления  $P = -200 \text{ атм}$  привело бы к снижению  $T_m$  примерно на  $7^\circ$  (согласно [5], в тройной точке  $dT_m/dp = 29 \text{ атм/град}$ ). Если для  $H_2$ , как и для He,  $dT_\lambda/dp \sim 100 \text{ атм/град}$ , то учитывая грубость оценок можно надеяться довести значение  $T_\lambda$  до  $6 - 8^\circ$ , а значение  $T_m$  также до  $6 - 8^\circ$ . Другими словами, достижение  $\lambda$ -перехода в жидком  $H_2$  не исключено (особенно, если учесть уменьшение производной  $dT_m/dp$  с понижением температуры). На основе расчетов типа [6] можно надеяться уточнить нижний предел для  $T_m$ , в чистом  $H_2$ , но без экспериментальных исследований обойтись все равно нельзя, особенно учитывая возможное влияние примесей He, вакансий и т. д.

Работа [7] свидетельствует о возможности получения неплотных однородных пленок He на достаточно гладких поверхностях. В этой связи интересно выяснить возможность получения аналогичных пленок  $H_2$ <sup>1)</sup>. На таком пути, если плотность  $H_2$  может быть сделана заметно меньшей плотности обычного жидкого водорода, есть основания рассчитывать на появление  $\lambda$ -перехода, а быть может и сверхтекучести квазидвухмерного типа. Вряд ли можно сомневаться в том, что затронутый круг вопросов заслуживает исследования.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
24 января 1972 г.

### Литература

- [1] R.I.Cornuccini. Pure and applied cryogenics, 5, "Liquid Hydrogen", ch. 2, Pergamonn Press, 1966.
- [2] G.Chaplin, Phys. Rev. A, 3, 1671, 1971.
- [3] С.Е.Нехт. Physica, 25, 1159, 1959.
- [4] A.T.J Hayward. American Scientist, 59, 434, 1971.
- [5] R.D.Goodwin, H.M.Roder. Cryogenics, 3, 12, 1963.
- [6] J.Tsuzuki. J.Phys. Soc. (Japan), 21, 2132, 1966.
- [7] M Bretz, I.G.Dash. Phys. Rev. Lett., 26, 963; 27, 647, 1971.

<sup>1)</sup> Интерес как в случае пленок, так и для макроскопических объемов представляют все молекулы  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $T_2$ , HD, HT и DT, поскольку таким образом можно выявить влияние и статистики, и массы. Это относится, конечно, и к проблеме металлизации водорода.