

О СВЕРХТЕКУЧЕЙ ПЛЕНКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ПОГРУЖЕННЫХ В НЕСВЕРХТЕКУЧИЙ РАСТВОР He^4 В He^3

В.Н.Пешков

Установлено, что на стенке в верхней фазе расслоившегося He^3 – He^4 образуется пленка из сверхтекучей нижней фазы.

Еще в первых опытах [1] по наблюдению расслоения жидких растворов He^3 в He^4 были обнаружены явления, указывающие на наличие сверхтекучего движения через верхнюю, богатую He^3 , фазу жидкого гелия. Однако, дальнейшие эксперименты по распространению звука и другие, показали, что богатая He^3 фаза жидкого гелия несверхтекуча.

Описываемые ниже опыты объяснили это противоречие и установили, что на поверхности твердых тел, погруженных в верхнюю, богатую He^3 фазу, образуется сверхтекучая пленка состоящая из нижней, богатой He^4 фазы.

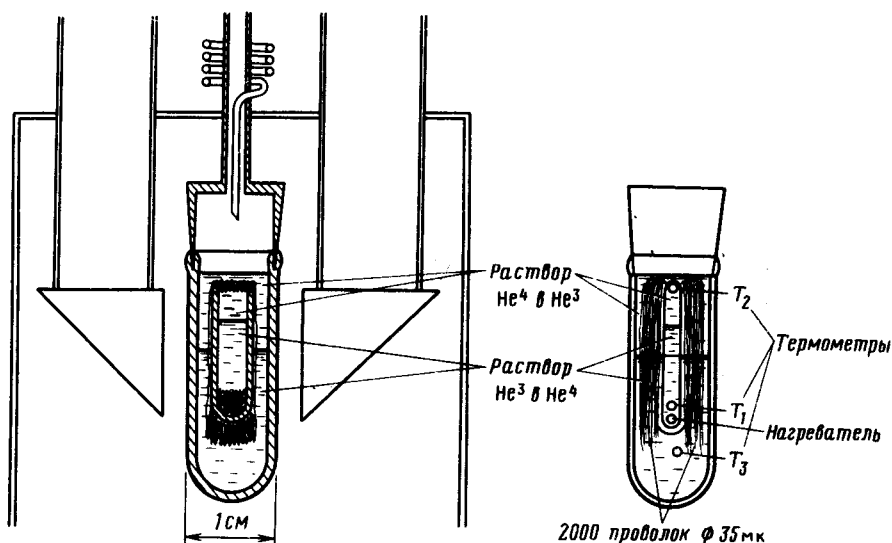


Рис. 1.

В первой серии экспериментов визуально наблюдалось движение уровня раздела фаз в пробирке, помещенной в расслоившийся раствор He^3 в He^4 , как показано на рис. 1. Для более быстрого перетекания по пленке, а также для большей уверенности в том, что наблюдается сверхтекучее течение по пленке, а не диффузия через верхнюю фазу, в пробирку помещали 2000 или 1074 медных проволочек диаметром 35 мкм или 390 константановых проволочек диаметром 100 мкм. Сверхтекучее движение вызывалось увеличением и уменьшением интенсивности света направляемого в прибор, либо включением нагревателя в пробирке. Эксперименты проводились при температуре около 0,5К. Наблюдалось как заполнение пробирки нижней фазой при интенсивном освещении,

так и вытекание He^4 и сравнение уровней при слабом освещении. Результаты экспериментов приведены на рис. 2, где по ординате отложена объемная скорость вытекания ($\dot{h}_1 > 0$) или втекания ($\dot{h}_1 < 0$) нижней фазы в пробирку, поделенная на общий периметр сечения всех проводочек и внутреннего сечения пробирки; по абсциссе – расстояние от края пробирки до ближайшего уровня. Несмотря на значительное изменение периметра и рода материала – медь, константан, стекло – результаты измерений, хотя и с разбросом, но укладываются в одну кривую. Как бывает с обычными сверхтекучими пленками, наблюдалось несколько случаев с заметно отличающимися скоростями – обведены кружком.

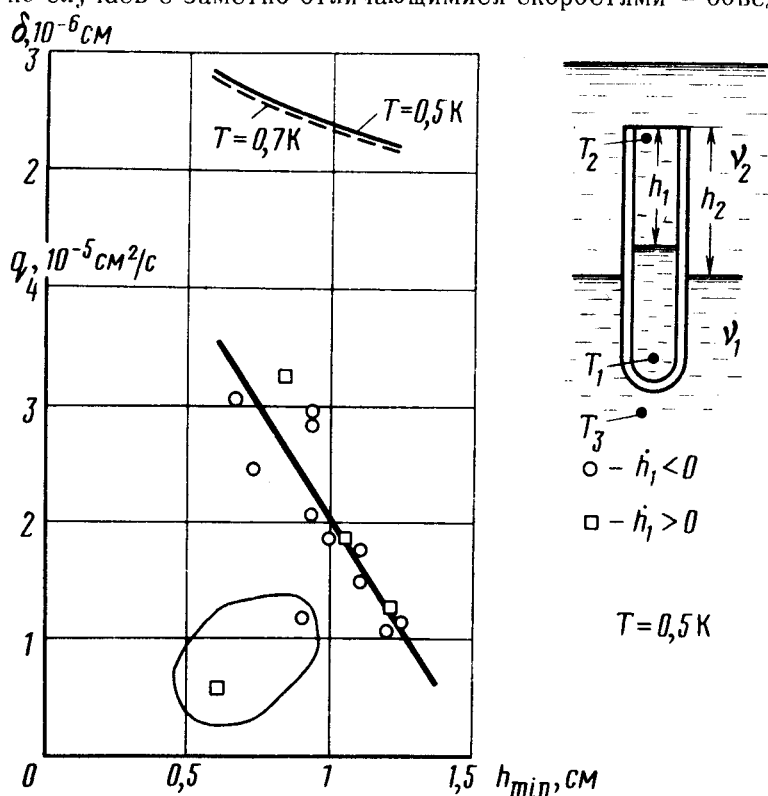


Рис. 2.

Поскольку движение по пленке сверхтекуче, то кроме наблюдаемого предела скорости протекания, можно было ожидать в сосудах с малым объемом слабозатухающих колебаний уровня раздела фаз при амплитудах не превышающих критическую скорость. Для наблюдения этого явления в камеру растворения He^3 криостата помещался конденсатор, состоящий из двух коаксиальных цилиндров из медной фольги, закрытых снизу, и третьего цилиндра вставленного между ними и представляющего одну из пластин конденсатора. Зазор между пластинами составлял $0,13 \text{ мм}$, их высота – $3,7 \text{ см}$. Конденсатор включался в контур генератора, изменение частоты которого, связанное с изменением уровня раздела фаз внутри конденсатора, записывалось самописцем. В экспериментах действительно удалось наблюдать слабозатухающие колебания уровня. Мало того, при некоторых условиях вообще возникали незатухающие колебания уровня, т. е. наблюдалось явление "поющей пленки", аналогичное возникновению звуковых колебаний в дюарах с жидким гелием.

Для обработки полученных результатов примем, что химпотенциал для каждого из изотопов Не имеет вид

$$\mu(x, z) = \mu(P) + mgz + Ax^{-3},$$

где P — давление, m — масса атома, g — ускорение силы тяжести, A — константа. Из равенства химпотенциалов при $x = \infty, z = 0$ и $x = \delta, z = z$ (см. рис. 3, верх), для зависимости толщины пленки нижней фазы от высоты получается формула $\delta = A^{1/3} [m_4 g (1 - \nu_2/4) z]^{1-1/3}$. Так как концентрация He^3 в верхней фазе ν_2 близка к единице, то толщина пленки

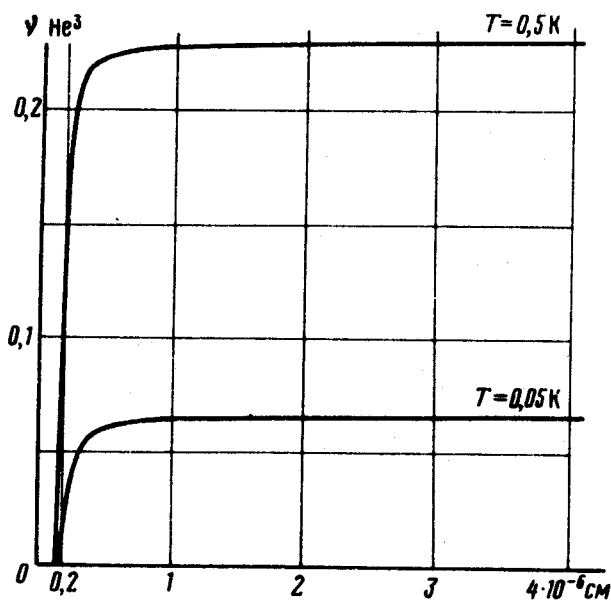
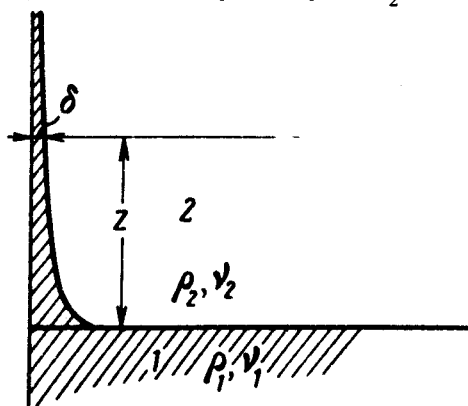


Рис. 3.

в растворе будет примерно на 10% больше, чем для He^4 в паровой фазе (при $\nu_2 = 0$). Зная $\delta(z)$, из наибольшей амплитуды колебаний уровня в конденсаторе — y_0 и периода колебаний — τ , можно рассчитать величину критической скорости — v_K и толщину пленки на верхнем краю конденсатора — $v_K \approx g \Delta \rho \tau y_0 / 3 \pi \rho_1 z$, $\delta = 2 \pi \rho y_0 / \tau \rho_s v_K$. При $T = 0,05 \text{ K}$ $\rho_1 = 0,142 \text{ г/см}^3$; $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2 = 0,06 \text{ г/см}^3$, $\rho_s / \rho_1 = 0,88$ и при $a = 0,013 \text{ см}$ и $z = 3 \text{ см}$ было наблюде n о $y_0 = 0,028 \text{ см}$ и $\tau = 40 \text{ сек}$, т. е. $v_K = 16 \text{ см/сек}$, $\delta = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

К сожалению, из визуального наблюдения перетекания можно лишь заключить, что при $T = 0,5\text{К}$ и $h = 1\text{ см}$. скорость перетекания по сверхтекучей пленке $q = 1,9 \cdot 10^{-5}\text{ см}^2/\text{сек}$. Если принять $\delta = 2,4 \cdot 10^{-6}\text{ см}$ и $\rho_s / \rho = 0,57$, то $v_K = 14\text{ см}/\text{сек}$, что по порядку величины совпадает с предыдущим.

Воспользовавшись для He^3 в пленке химпотенциалом вида

$$\mu(x, \nu) = \epsilon_0 + kT_{\Phi} [1 - \pi^2 T^2 / 12 T_{\Phi}^2] + Ax^{-3} (n_4 - n_3) / n_4,$$

где $T_{\Phi} = \hbar^2 (3\pi^2 n \nu)^{2/3} / 2m^*k$, ϵ_0 — нулевая энергия, $m^* = 2,4 m_3$ — эффективная масса, n — атомная плотность раствора, n_3 и n_4 — атомные плотности жидкого He^3 и He^4 , для зависимости $\nu(x)$ в пленке получим кривые, приведенные на рис. 3 внизу.

Концентрация при больших x принималась такой же, как и в нижней фазе. Из рисунка видно, что концентрация He^3 в пленке постоянна и лишь при $x < 20\text{Å}$ резко падает до нуля. Это означает, что атомы He^3 не взаимодействуют с гладкой стенкой. Такое явление действительно наблюдалось [2] при изучении сдвиговых колебаний кварца, находящегося в верхней фазе. Эффективная вязкость оказалась в сотни раз меньше, чем для чистого He^3 , хотя концентрация He^4 в верхней фазе была порядка $10^{-5} - 10^{-10}$.

Таким образом на основании приведенных здесь данных, а также результатов работ [2] следует, что наличие сверхтекучей пленки приводит к появлению целого ряда новых эффектов.

Необходимо пересмотреть вопрос о предельных температурах в криостате растворения He^3 и конструкции теплообменников, неверными оказываются утверждения, что в растворах $\text{He}^3 - \text{He}^4$ He^3 принимает тангенциальную скорость движения твердой стенки, и ряд других.

Автор выражает благодарность П.Л.Капице за создание условий для проведения работы, А.Ф.Андрееву за ценные дискуссии и В.М.Мишачеву за помощь при проведении экспериментов.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 января 1975 г.

Литература

- [1] В.П.Пешков, К.Н.Зиновьева. ЖЭТФ, 32, 1256, 1957.
[2] А.П.Боровиков, В.П.Пешков. Тезисы докладов НТ-18, Киев, 1974, стр. 27; В.П.Пешков. НТ-18 стр. 25.