

Б. Н. ЕСЕЛЬСОН и Н. Г. БЕРЕЗНЯК

# ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ РАСТВОРОВ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 22 IV 1954)

Продолжая систематическое изучение свойств растворов изотопов гелия ( $\text{He}^3$  в  $\text{He}^4$ ), мы определили зависимость поверхностного натяжения этих растворов от концентрации легкого изотопа и температуры.

Из возможных методов, не требующих большого количества жидкости, был выбран метод определения поверхностного натяжения по разности высот подъема жидкости в U-образной трубке с коленами различных диаметров (см. рис. 1, б). Возможные ошибки, связанные с отличием концентрации растворов в широкой и узкой трубках, исключались, так как все опыты проводились при температурах ниже  $\lambda$ -точки.

В области гелиевых температур обычно ведут наблюдение за подъемом жидкости в трубках через четыре стеклянные стенки азотного и гелиевого дьюаров. Искажения, связанные соптической неоднородностью этих стеклянных стенок, могут играть существенную роль, так как измеряемое поверхностное натяжение очень мало. Для исключения этих ошибок наблюдения за разностью уровней проводились при помощи двух призм (рис. 1, а)  $P_1$  и  $P_2$ , одна из которых находилась в жидком гелии, а вторая — выше капли прибора. Нейзильберовая трубка, соединяющая призмы, сверху была прикрыта плоскопараллельной стеклянной пластинкой  $B$ , уплотненной при помощи плицеина. Правильная установка призм осуществлялась при помощи поворотных приспособлений  $M_1$  и  $M_2$ . Разность уровней жидкости отсчитывалась катетометром, позволяющим проводить измерения с точностью до 0,02 мм. При указанном устройстве и освещении прибора неоновой или люминесцентной лампой мениски были резко очерчены. Все это обеспечивало точность определения поверхностного натяжения около 1%, что лучше 5%, получаемых обычно (<sup>1,2</sup>).

Опыт проводился следующим образом. После заполнения дьюара жидким гелием и установления нужной температуры проводилась конденсация смеси изотопов в приборе. При этом для максимальной чистоты газ перед конденсацией пропусклся через змеевик, погруженный в жидкий водород. После окончания конденсации закрывался кран  $K$  и проводились измерения

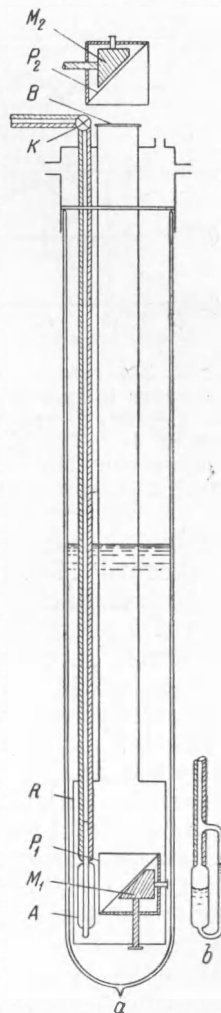


Рис. 1. Прибор для измерения поверхностного натяжения

разности уровней жидкости  $H$  при строго постоянной температуре. Меняя температуру в дьюаре, можно было снять зависимость  $H$  от  $T^\circ\text{K}$ , причем в течение одного и того же опыта можно было пройти весь температурный интервал как вниз, так и вверх. Полученные при этом данные хорошо совпадали — точно так же как и данные, полученные в разные дни.

По измеренной разности уровней жидкости вычислялось поверхностное натяжение по формуле:

$$2\alpha \left( \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2} \right) = Hg(D - d), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — поверхностное натяжение,  $b_1$  и  $b_2$  — радиусы кривизны нижних точек менисков,  $H$  — расстояние между нижними точками менисков в двух трубках радиусов  $r_1$  и  $r_2$ ,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $D$  — плотность жидкости и  $d$  — плотность пара. Необходимо для пользования этой формулой, чтобы соотношение между  $r_1$  и  $b_1$  и  $r_2$  и  $b_2$  определялось по таблицам Сагдена <sup>(3)</sup>. В использованном нами приборе  $r_1 = 0,138$  мм, а  $r_2 = 1,836$  мм. Разность плотностей жидкости и пара для раствора определялась по известным разностям для чистых компонент <sup>(4-6)</sup> в предположении аддитивности.

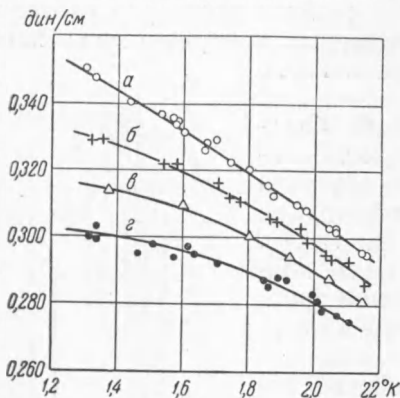


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения  $\alpha$  дин/см от температуры: а —  $\text{He}^4$ , б — раствор с содержанием  $\text{He}^3$  1,00%, в — раствор с содержанием  $\text{He}^3$  2,40%, г — раствор с содержанием  $\text{He}^3$  4,23%

Измерялось поверхностное натяжение  $\text{He}^4$  и растворов с содержанием  $\text{He}^3$  в 1,00; 2,40 и 4,23% между  $1,35^\circ\text{K}$  и  $\lambda$ -точкой. Результаты представлены на рис. 2, из которого следует, что по мере увеличения концентрации  $\text{He}^3$  поверхностное натяжение уменьшается.

Зависимость поверхностного натяжения растворов от температуры несколько слабее, чем у чистого  $\text{He}^4$ , что, вероятно, определяется тем обстоятельством, что с понижением температуры вклад примесной части в поверхностную энергию остается неизменным, в то время как вклад, определяемый ротонами и фононами, уменьшается.

Численные значения и зависимость коэффициента поверхностного натяжения  $\text{He}^4$  от температуры хорошо совпадают с аналогичными данными, полученными ранее <sup>(1,2)</sup>, за исключением низких температур, где наши значения  $\alpha$  несколько выше. Большой интерес представляет сравнение этих экспериментальных данных с результатами, полученными Ахиезером и Померанчуком при теоретическом рассмотрении вопроса. Авторы этой работы рассматривают поверхностную энергию жидкого гелия как сумму энергий квантов, соответствующих колебаниям поверхности, и предполагают для температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения  $\text{He}^4$  следующее выражение\*:

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{2,6}{4\pi} \left( \frac{\rho}{\alpha_0} \right)^{1/2} \frac{(kT)^{1/2}}{\hbar^{1/2}} \quad \text{при } T \ll \theta_s. \quad (2)$$

\* При этом используется закон дисперсии  $\omega = \sqrt{\frac{\alpha}{\rho} k^3}$ , где  $k$  — волновой вектор.

Аналогичная формула была независимо получена Аткинсом.

Понижение поверхностного натяжения по мере увеличения концентрации  $\text{He}^3$  свидетельствует о положительной адсорбции легкого изотопа, избыточное количество которого на поверхности  $\Gamma$  может быть рассчитано по формуле Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \frac{d\alpha}{dC}, \quad (3)$$

где  $C$  — концентрация  $\text{He}^3$  в растворе. На основании полученных экспериментальных данных были построены кривые (рис. 3), изображающие зависимость поверхностного натяжения от концентрации  $\text{He}^3$  в растворе, по которым было определено значение  $d\alpha/dC$ .

Вычисления, сделанные по формуле (3), показывают, что, например, для температуры  $1,70^\circ\text{K}$   $\Gamma$  меняется от  $0,66 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup> при  $C = 1,00\%$   $\text{He}^3$  до  $1,79 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup> при  $4,23\%$   $\text{He}^3$ .

В настоящее время проводятся опыты по измерению поверхностного натяжения растворов  $\text{He}^3$  в  $\text{He}^4$  с большим содержанием  $\text{He}^3$  и в более широком температурном интервале.

В заключение пользуемся случаем поблагодарить Б. Г. Лазарева, А. И. Ахизера и И. Я. Померанчука за интерес, проявленный к работе.

Физико-технический институт  
Академии наук СССР

Поступило  
25 III 1954

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> A. Van Urk, W. H. Keesom, H. Kamerlingh Onnes, Comm. Leid., No. 179a, 1925. <sup>2</sup> J. F. Allen, A. D. Misener, Proc. Cambr. Phil. Soc., 34, 299 (1938). <sup>3</sup> S. Sugden, J. Chem. Soc., 119, 1483 (1921). <sup>4</sup> E. Mathias, C. A. Crommelin, H. Kamerlingh Onnes, J. C. Swallow, Comm. Leid., No. 172b, 1925. <sup>5</sup> H. Kamerlingh Onnes, J. D. Boks, Comm. Leid., No. 170b, 1924. <sup>6</sup> E. K. Grilly, E. F. Hammel, S. G. Sydorik, Phys. Rev., 75, 1103 (1944).

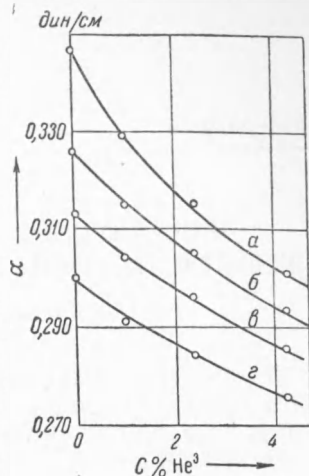


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации легкого изотопа для различных температур:  $\alpha$  —  $1,35^\circ$ ,  $\beta$  —  $1,70^\circ$ ,  $\gamma$  —  $1,90^\circ$ ,  $\delta$  —  $2,10^\circ\text{K}$