

Б. Н. ЕСЕЛЬСОН и Б. Г. ЛАЗАРЕВ

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ He^3 в He^4

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 15 II 1950)

За последние три года появилось много работ, посвященных вопросам разделения изотопов гелия и изучения некоторых свойств чистого He^3 и смесей $\text{He}^3 - \text{He}^4$.

Одной из причин проявления такого большого интереса к этим вопросам является стремление изучить свойства жидкого He^3 , знание которых существенно для теории He II, и рассмотреть фазовый переход He I— He II в растворах He^3 в He^4 . Возможно более полное изучение других физических свойств легкого изотопа гелия представляет также большой интерес.

Получение чистого He^3 или гелия, сильно обогащенного этим изотопом, связано с большими трудностями, возникающими из-за крайне малого содержания легкого изотопа в обычном гелии. Концентрация He^3 в гелии, получаемом из газовых скважин, колеблется от $0,6 \cdot 10^{-7}$ до $2,0 \cdot 10^{-7}$ ⁽¹⁾. Содержание его в гелии, получаемом из воздуха, приблизительно на порядок выше и составляет $1,2 \cdot 10^{-6}$ ⁽²⁾. Однако из-за малости содержания гелия в воздухе практически трудно получить его в количестве, достаточном для извлечения легкого изотопа. Поэтому исходным гелием служит более бедный гелий из скважин.

По причине столь малого содержания He^3 в гелии обычные методы для его концентрирования мало эффективны ⁽³⁻⁵⁾. По этой же причине мало изучены свойства растворов He^3 в He^4 .

В настоящем сообщении приводятся кратко результаты наших исследований по разработке эффективной методики обогащения гелия легким изотопом и получению данных о зависимости температуры λ -перехода (перехода He I— He II) от содержания He^3 и об особенностях явления перетекания He II по пленке смачивания в смесях $\text{He}^3 - \text{He}^4$. При этом описание метода обогащения откладывается до подробного сообщения, здесь же упомянем лишь, что сначала проводится обогащение в $\sim 10^3$ раз путем использования термомеханического эффекта и затем еще в $\sim 2 \cdot 10^2$ раз в разгоночной колонке. Степень обогащения определялась не пределом методики, а необходимостью получения для измерений окончательной смеси в количестве около 20 см³. Смеси, с которыми проведены измерения, содержали He^3 до 1,5%. Определение концентраций было сделано путем сравнения (дифференциальным методом) упругости пара над He^4 и над смесью, в предположении справедливости закона Рауля для этих концентраций и с использованием данных об упругости пара чистого He^3 ⁽⁶⁾.

Смещение λ -перехода. Определение температуры λ -перехода с количеством жидкого гелия в несколько кубических миллиметров удобнее всего было сделать, наблюдая температуру начала перетекания жидкости по пленке смачивания. Для этой цели использовался прибор, подобный прибору П. Г. Стрелкова ⁽⁷⁾ для изучения перете-

кания He II по пленке, но видоизмененный для работы с малыми количествами жидкости. Основная часть прибора изображена на рис. 1 — это сообщающиеся по пленке гелия два колена тонкостенной капиллярной трубки (диаметром ~ 1 мм). Прибор погружен в жидкий гелий, соблюдалась тщательная экранировка от излучения.

Так как колена сосуда имели разную длину, то сконденсированный в них гелий (через капилляр, идущий наверх наружу) стоял на разных уровнях. При достижении температуры λ -перехода начиналось перетекания гелия из верхнего колена в нижнее. Скорость перетекания определялась при разных температурах несколько ниже λ -перехода, при этом положение уровней жидкости отсчитывалось катетометром. Так как вблизи λ -перехода скорость перетекания круто и практически линейно зависит от температуры, то из таких измерений можно было определить температуру перехода He I — He II с ошибкой, не превышающей $0,005^\circ$.

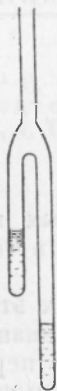


Рис. 1

Такие измерения были проделаны с жидким гелием, содержащим в одном случае $0,34\%$ He³, в другом $1,5\%$ He³. Смещение (понижение) температуры λ -перехода в первом случае лежит за пределами точности измерений, во втором оказалось равным $0,02^\circ$.

Полученный результат не подтвердил ни соображений Лондона и Райса⁽⁸⁾, ни соображения Стоута⁽⁹⁾. В первой из этих работ рассматриваемый переход принимается, вопреки общепринятой точке зрения, как переход первого рода с выводом о невозможности содержания в He II легкого изотопа в количестве более 1% , во второй — смещение температуры перехода на порядок больше экспериментального и противоположного знака.

Когда настоящая работа готовилась к печати, появилась работа Абрагама, Вайнштока и Осборна⁽¹⁰⁾, которые, используя He³, полученный из трития, также исследовали смещение температуры λ -перехода, и новая работа Стоута⁽¹¹⁾, использующая результаты этих авторов. Наши данные для концентраций, при которых может проводиться сравнение, заметно разнятся от результатов этих авторов: зависимость температуры перехода He I — He II от примеси легкого изотопа, по нашим данным, составляет $d\theta/dC = 1,3$ (θ — температура перехода, C — концентрация He³), по Абрагаму, Вайнштоку и Осборну $d\theta/dC = 5$. По данным этих авторов, точность определения θ составляла $\pm 0,05^\circ$ и при малых концентрациях (около 1%) не может дать правильного представления об искомой зависимости.

Перетекание по пленке. При определении смещения λ -перехода в описанном приборе выяснилось отличие перетекания по пленке смеси и обычного He II. Известно, что скорость этого перетекания у He II не зависит от разности уровней, вплоть до их полного выравнивания, и при данной температуре постоянна. При опытах с He⁴ в описанном приборе действительно наблюдалась указанная картина. При работе с гелием, обогащенным легким изотопом, происходило совсем иное. В этом случае скорость перетекания быстро уменьшается по мере уменьшения разности уровней жидкости в коленах и становится совсем малой, когда разность эта доходит до $1 - 1,5$ мм. При этом зависимость скорости перетекания V (в $\text{см}^3/\text{см}/\text{сек.}$) от разности уровней Δh почти линейна (см. рис. 2).

Если опыт проводится при температуре вблизи λ -перехода, перетекание происходит с постоянной скоростью (несколько меньшей, чем у обычного He II при этой температуре) до тех пор, пока разность уровней не сделается малой, а затем, с дальнейшим уменьшением разности уровней, уменьшается. При все большем удалении от

λ -температуры увеличивается разность уровней, при которой начинается уменьшение скорости перетекания, и при достаточно низкой температуре ($\sim 1,5^\circ\text{K}$) уже совсем не удастся заменить участок с постоянной скоростью перетекания. В том интервале разности уровней, где наблюдается уменьшение скорости перетекания, это явление протекает одинаково при разных температурах, но сильно зависит от концентрации He^3 в жидкости.

Обнаруженное явление может быть объяснено следующим образом. По мере перетекания гелия по пленке из одного колена прибора в другое в том колене, из которого гелий вытекает, происходит увеличение концентрации He^3 , так как по пленке вытекает сверхтекучая часть гелия, т. е. He^4 . Одновременно с этим механизмом действует механизм выравнивания концентраций через газовую фазу. При температурах значительно более низких, чем λ -температура, перетекание происходит с большей скоростью и приводит быстро к значительной разности концентраций. Вследствие этого возникает осмотическое давление, которое ограничило бы перетекание, если бы не происходило выравнивание концентраций через газовую фазу, и гелий перетекал бы лишь до определенной разности уровней, как это и наблюдали (правда, при очень малой концентрации) Доунт, Пробст и Джонстон (¹²) в опыте, в котором было устранено выравнивание через газовую фазу.

Благодаря выравниванию концентраций через газовую фазу скорость перетекания теперь регулируется скоростью этого выравнивания. По мере уменьшения разности концентраций уменьшается скорость их выравнивания через газовую фазу, а следовательно, уменьшается и скорость перетекания. При температурах, близких к температуре λ -перехода, перетекание происходит с малой скоростью и приводит поэтому к малой разности концентраций; здесь перетекание будет происходить с постоянной скоростью до тех пор, пока не будет достигнута разность уровней, соответствующая осмотическому давлению для малой разности концентраций. После этого процесс перетекания опять будет регулироваться скоростью выравнивания концентраций через газовую фазу.

В заключение упомянем, что исходный обогащенный гелий позволил нам в миниатюрном приборе, в котором использовался термомеханический эффект для дальнейшего обогащения легким изотопом, убедиться в существовании He II до концентраций более 30% He^3 при температуре $1,4^\circ\text{K}$.

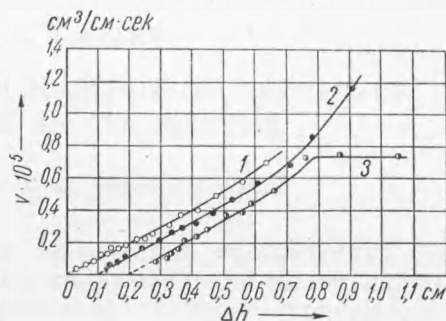


Рис. 2. Зависимость скорости переноса по пленке от разности уровней для $\text{He}^3/\text{He}^4 = 1,5 \cdot 10^{-2}$. Кривые 2 и 3 смещены вдоль оси абсцисс на 1 и 2 мм соответственно. 1 — $1,47^\circ\text{K}$, 2 — $2,08^\circ\text{K}$, 3 — $2,10^\circ\text{K}$

Поступило
14 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ L. Aldrich and A. Nier, Phys. Rev., **74**, 1225 (1948). ² L. Aldrich and A. Nier, *ibid.*, **74**, 1590 (1948). ³ B. McIntier, L. Aldrich and A. Nier, *ibid.*, **72**, 510 (1947). ⁴ A. Andrew and W. Smith, *ibid.*, **74**, 496 (1948). ⁵ B. McIntier, L. Aldrich and A. Nier, *ibid.*, **74**, 946 (1948). ⁶ S. Sidoriak, E. Grilly and E. Hammel, *ibid.*, **75**, 303 (1949). ⁷ П. Г. Стрелков, ЖЭТФ, **10**, 743 (1940). ⁸ F. London and O. Rice, Phys. Rev., **73**, 1188 (1948). ⁹ J. W. Stout, *ibid.*, **74**, 605 (1948). ¹⁰ A. Abraham, B. Weinstock and D. Osborn, *ibid.*, **76**, 864 (1949). ¹¹ J. W. Stout, *ibid.*, **76**, 864 (1949). ¹² J. Daunt, R. Probst and H. Johnston, *ibid.*, **73**, 638 (1948).