

Я. И. ФРЕНКЕЛЬ, член-корреспондент Академии Наук СССР

О СВЕРХТЕКУЧЕСТИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ II

Сверхтекучесть (т. е. чрезвычайно малую вязкость) жидкого гелия II. Лондон⁽¹⁾ и Тисса⁽²⁾ объясняют на основе теории Эйнштейна о вырождении идеального газа Бозе при низких температурах. Согласно этой теории при температурах, лежащих ниже некоторой температуры T_0 , частицы такого газа начинают скопляться в нижнем квантовом состоянии и перестают влиять на вязкость и теплопроводность газа, которые определяются при этом поведением остальных частиц газа. Число последних, а также их энергия при дальнейшем понижении температуры уменьшаются, в связи с чем вязкость системы должна падать, стремясь к нулю при $T=0$.

Подобная точка зрения встречает однако серьезные возражения. Прежде всего весьма сомнительно, чтобы жидкий гелий с его относительно высокой плотностью можно было трактовать, как идеальный газ. В настоящее время общепринято считать, что жидкости вблизи точки их кристаллизации скорее сходны с твердыми телами, нежели с газами. В применении к гелию эти представления были развиты Лондоном в одной из его предыдущих работ, послужившей основой для весьма интересной теории Фрелиха о природе перехода от гелия II к гелию I.

При $T=0$ гелий остается жидким вплоть до давлений в 25 атм; этот факт свидетельствует о том, что его нельзя описывать, как обычную жидкость, обладающую квази-кристаллической структурой, отличающейся от структуры соответствующего кристалла наличием некоторой степени беспорядка. Действительно, степень беспорядка измеряется энтропией системы, стремящейся к нулю по мере понижения температуры до абсолютного нуля.

Исходя из этих соображений, естественно предположить, что гелий II следует рассматривать как вещество, обладающее в среднем правильным расположением атомов и отличающееся от обычного кристалла наличием искажений (искривлений) атомных слоев, причем искривленные поверхности этих слоев играют роль различных кристаллографических плоскостей. Подобный тип структуры не является чем-либо исключительным: так например, согласно Фриделю, он встречается в случае смектической фазы многих жидких кристаллов. Он обусловлен при этом сильным поперечным притяжением стержнеобразных молекул, тогда как в случае гелия II искривление кристаллографических поверхностей является следствием наличия интенсивного «остаточного» движения атомов вблизи температуры абсолютного нуля.

С этой точки зрения к гелию II едва ли можно применять понятие «вязкости». Действительно, вязкое течение обычной жидкости следует рассмат-

ривать как своего рода направленный диффузионный процесс, в котором атомы принимают индивидуальное участие путем постепенного изменения своих равновесных положений. Связь между вязкостью и диффузией иллюстрируется тем фактом, что зависимость этих процессов от температуры определяется одной и той же энергией активации U (коэффициент диффузии пропорционален $e^{-u/kT}$, тогда как коэффициент вязкости пропорционален $e^{u/kT}$). Очевидно однако, что коэффициент диффузии любого вещества—как жидкого, так и твердого—по мере понижения температуры должен стремиться к нулю. Если бы следовательно вязкость гелия II была обычным образом связана с его коэффициентом диффузии, то при $T=0$ она должна была бы стремиться к бесконечности, а не к нулю, как это имеет место в действительности.

Хорошо известно, что в кристаллах в отличие от жидких и аморфных тел под действием скалывающих напряжений возникает процесс течения, существенным образом отличающийся от обычного вязкого течения (хотя внешне и сходный с ним), называемый пластической деформацией. Это пластическое течение характеризуется обычно определенным «пределом упругости» (т. е. некоторым минимальным значением скалывающего усилия, которое необходимо для его начала) и сопровождается «упрочнением» вещества; последнее приводит к прекращению процесса течения (если только скалывающее напряжение при этом не увеличивается). Современные исследования показали, что монокристаллы в их девственном состоянии (т. е. до начала пластической деформации) чрезвычайно «мягки», их предел упругости в сотни и тысячи раз меньше величины технического предела упругости соответствующего вещества в поликристаллическом состоянии. В результате изучения явления пластической деформации с помощью фотоэлектрических методов удалось установить, что увеличение степени совершенства кристалла сопровождается практически беспредельным понижением предела упругости. Пластический сдвиг сопровождается однако искажением решетки; он влечет поэтому за собой быстрое повышение предела упругости. В отличие от вязкого течения пластическое течение может иметь место при температуре абсолютного нуля. Оно затормаживается при этих условиях только вследствие упомянутого выше процесса упрочнения. Техническое пластическое течение, или так называемый «крип» поликристаллических веществ, подобно обычному вязкому течению облегчается повышением температуры (в действительности оно определяется множителем $e^{-u'/kT}$, где u' имеет иное численное значение, нежели величина u , отвечающая процессу диффузии).

Возвращаясь к случаю гелия II, мы видим таким образом, что его сверхтекучесть легко может быть объяснена в предположении:

- 1) что его предел упругости равен нулю и
- 2) что он не «упрочняется» в процессе пластической деформации.

Последнее предположение непосредственно вытекает из того факта, что гелий II остается «жидким», т. е. пластичным; его можно интерпретировать с теоретической точки зрения, считая, что всякое микроскопическое искажение кристаллической решетки, возникающее в процессе пластического сдвига, немедленно ликвидируется вследствие наличия «остаточного» движения атомов (играющего роль теплового движения в обычных кристаллах). Естественно предполагать, что это «остаточное» движение, стремящееся, в отличие от обычного теплового движения, внести порядок в структуру гелия II вместо того, чтобы вызвать в ней беспорядок, может понизить до нуля значение его предела упругости.

Сейчас нельзя еще сказать определенно, обладает ли гелий II бесконечно большой текучестью с самого начала (как это полагает Капица),

или же его текучесть постепенно возрастает до бесконечности по мере понижения температуры до нуля (согласно данным Кезома и некоторых других авторов). Обе возможности допустимы с теоретической точки зрения, хотя вторая и представляется более правдоподобной.

Увеличение сопротивления течению, наблюдающееся при повышении температуры, можно было бы рассматривать, как естественное следствие возникновения беспорядка, создаваемого тепловым движением и приводящего в конце концов к переходу от гелия II к гелию I, который ведет себя, как обычная жидкость.

С другой стороны, можно представить себе, что поведение гелия II в отношении механического течения может быть уподоблено поведению сверхпроводящих тел в отношении течения по ним электричества; оба процесса не сопровождаются выделением тепла, и следовательно сопротивление течению должно отсутствовать.

Мы не будем пытаться описывать здесь механизм пластического течения в кристаллах и объяснять, почему этот тип течения может иметь место при температуре абсолютного нуля. Этот вопрос рассмотрен в специальных статьях, где показано, что пластическое течение протекает аналогично процессу двойникования; оно распространяется в форме волны и заключается в последовательном вращении некоторых кристаллографических плоскостей в более или менее узком слое кристаллического вещества (атомы переходят при этом в эквивалентные или же в симметричные положения). Какова бы ни была точная картина этого процесса, ясно, что в основе его лежит организованное коллективное движение атомов, могущее возникать при сравнительно ничтожных значениях внешней силы, тогда как обычное вязкое течение отвечает дрейфу отдельных атомов, налагающемуся на их хаотическое самодиффузионное движение в направлении действия внешней силы.

Ясно таким образом, что при низких температурах вязкое течение аморфных тел должно прекращаться, тогда как пластическое течение кристаллических тел должно сохраняться вплоть до температуры абсолютного нуля. В случае такого вещества, как гелий, оно должно приводить к возникновению сверхтекучести, так как «остаточное» движение атомов обеспечивает сохранение правильности их расположения, исключая таким образом явление «упрочнения» и по видимому понижая до нуля численное значение предела упругости.

Физико-технический институт.
Ленинград.

Поступило
23 II 1939.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ F. London, Phys. Rev., **54**, 947 (1938). ² L. Tisza, Nature, **141**, 913 (1938). ³ F. London, Proc. Roy. Soc. (1935). ⁴ H. Fröhlich, Physica (1936). ⁵ J. Frenkel, ZS. f. Phys., **35**, 652 (1926). ⁶ M. Podaschewsky, **2**, 294 (1932). ⁷ J. Frenkel a. T. Kontorowa, Sow. Phys., **13**, 1 (1938).