

мя существуют методы получения еще более низких температур. Однако изложение этих методов выходит за рамки нашего курса.

6. При низких температурах резко изменяются свойства некоторых веществ. Например, резина становится хрупкой как стекло, а свинец становится упругим. Охлажденные в жидком кислороде парафин, яичная скорлупа, некоторые красители и другие вещества после облучения их ультрафиолетовыми лучами начинают светиться. При температурах порядка нескольких градусов абсолютной шкалы удельные сопротивления некоторых металлов и сплавов становятся исчезающе малыми. Это явление, получившее название сверхпроводимости, будет рассмотрено во втором томе курса.

§ 13.6. Сверхтекучесть гелия

1. В 1938 г. академиком П. Л. Капицей было открыто явление сверхтекучести гелия при сверхнизких температурах. В § 13.3 указывалось, что гелий принадлежит к числу газов с очень низкой критической температурой. При атмосферном давлении гелий сжижается при температуре 4,22 К и остается жидким вплоть до абсолютного нуля¹. При температуре 2,19 К в жидком гелии происходит фазовый переход — жидкий гелий I, существующий при $T > 2,19$ К, переходит без выделения теплоты в жидкий гелий II, существующий при $T < 2,19$ К. Фазовый переход такого типа носит название фазового перехода II рода (см. § 15.5). Гелий II коренным образом отличается от гелия I по своей теплопроводности и вязкости. Гелий I ведет себя приблизительно так же, как другие сжиженные газы при низких температурах (водород, неон, воздух). Теплопроводность и вязкость этих жидкостей невелики. Например, коэффициент вязкости гелия I вблизи температуры 4,22 К составляет 10^{-6} Па · с. Напомним для сравнения, что коэффициент вязкости водорода при $t = 20^\circ \text{C}$ равен 10^{-5} Па · с.

Наиболее замечательным свойством гелия II оказалось отсутствие вязкости у этой жидкости. Гелий II протекает через капилляры практически без трения. Это свойство гелия II было названо **сверхтекучестью гелия**. Измерения коэффициента вязкости гелия II наиболее чувствительными методами показали, что коэффициент вязкости у гелия II во всяком случае меньше 10^{-12} Па · с.

2. Согласно так называемой двухжидкостной модели гелий II представляет собой смесь двух жидкостей — **сверхтекучей** и **нормальной**. Сверхтекучая компонента не участвует в переносе энергии и движется без трения. Нормальная компонента гелия II испытывает трение и осуществляет перенос энергии в жидкости. Существование в гелии II двух компонент может быть обнаружено на следующем опыте (рис. 13.10). В гелий II, находящийся в сосуде Дьюара, помещена

¹ Гелий в твердом состоянии можно получить при температурах, меньших 4,22 К, если давление превышает 22 атмосферы.

колбочка, в широкой части которой находится нагреватель в виде проволочной спирали. При нагревании спирали из горлышка колбы вытекает струя гелия, которая может быть обнаружена по вращению легкой вертушки, поставленной на пути струи. Однако количество жидкости в колбе не уменьшается и, следовательно, гелий не только вытекает из нее, но и одновременно втекает в колбу из сосуда Дьюара. В одних и тех же местах жидкости существуют два потока, направленные в противоположные стороны. Вытекающий поток гелия II переносит теплоту и оказывает давление на вертушку. Эта часть жидкости и является нормальным гелием II. Втекающий поток гелия II

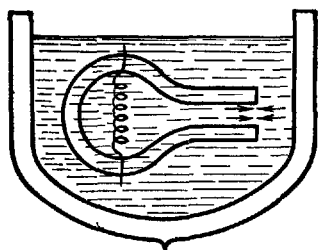


Рис. 13.10.

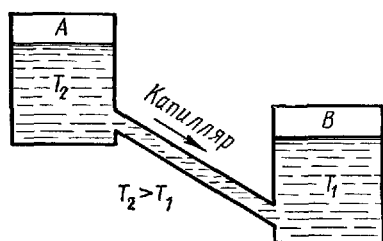


Рис. 13.11.

не несет теплоты и не оказывает давления. Эта часть жидкости является сверхтекучей. Возле спирали сверхтекучая часть гелия II превращается в нормальную и обе части гелия движутся одна сквозь другую без трения. Огромная теплопроводность гелия II связана с наличием двух встречных потоков жидкости: в направлении убывания температуры течет нормальная часть гелия II и одновременно в противоположном направлении течет сверхтекучая часть. При течении гелия II по тонким трубкам протекает, главным образом, сверхтекучая часть жидкости, а нормальный гелий II остается на месте. Поэтому, если из сосуда A (рис. 13.11) гелий по капилляру перетекает в сосуд B, то в A жидкость нагревается, а в B охлаждается. Причина этого заключается в том, что вся энергия, оставшаяся в нормальной части жидкости, распределяется на меньшую массу, это приводит к повышению температуры. В сосуд B переходит сверхтекучая часть жидкости, не переносящая энергию, поэтому температура в сосуде B понижается.

Идея о существовании в гелии II сверхтекучей и нормальной жидкостей позволила развить гидродинамическую теорию гелия II, в которой нашли свое макроскопическое объяснение свойства гелия II. На важнейший вопрос о природе этих свойств гидродинамическая теория ответить не могла¹.

¹ Серьезным успехом макроскопической гидродинамики гелия II явилось объяснение существования второго звука в гелии II. В то время как в обычных жидкостях могут распространяться обычные звуковые волны, в гелии II, помимо обычных звуков, распространяющихся со скоростью 250 м/с, могут существовать волны другого типа — так называемый второй звук, скорость распространения которого приблизительно в 10 раз меньше.

3. Рассмотрим некоторые основы современных квантовых представлений о сверхтекучести гелия II. Прежде всего следует сказать, что только квантовая теория объяснила, почему именно гелий является единственной незамерзающей жидкостью при очень низких температурах и нормальном давлении. Квантовая теория показывает, что, в отличие от классических представлений, при любой как угодно низкой температуре вещества (в том числе и при $T = 0$) существуют «нулевые» колебания атомов и молекул. Им соответствует некоторая «нулевая энергия», которую невозможно отнять у вещества. Ответ на вопрос о том, остается ли вещество вблизи абсолютного нуля жидким или твердым, зависит от того, что играет определяющую роль — межмолекулярное притяжение, вызывающее образование кристаллической решетки, или «нулевые колебания», препятствующие этому образованию.

В гелии силы взаимодействия между атомами весьма слабы, а «нулевые колебания», в силу легкости гелиевых атомов, весьма интенсивны. Поэтому при обычных давлениях кристаллическая решетка в гелии не образуется и он не замерзает. При абсолютном нуле тепловое движение частиц отсутствует¹, а при очень низких температурах оно весьма малоинтенсивно. Поэтому при таких температурах можно рассматривать тепловое движение в гелии как совокупность некоторых элементарных «тепловых возбуждений». В квантовой теории доказано, что энергия тепловых возбуждений может изменяться лишь порциями — квантами (см. § 11.6).

Нагревание жидкого гелия от $T = 0$ до некоторой малой температуры должно привести к появлению в нем «элементарных возбуждений». С появлением этих возбуждений связан запас внутренней энергии в жидкости и существование в ней трения.

Нормальная часть жидкого гелия II представляет собой ту часть жидкости, в которой возникают элементарные тепловые возбуждения. Однако из детального рассмотрения элементарных возбуждений в гелии, основанного на законах сохранения энергии и импульса, следует, что возможны состояния гелия II, в которых «элементарные возбуждения» не возникают. Этим состояниям соответствует сверхтекучая часть гелия. Выяснилось, что частицы сверхтекучей части гелия II весьма сильно взаимодействуют друг с другом и образуют связанный коллектив, называемый иногда конденсатом. Благодаря сильному взаимодействию частиц в сверхтекучей части гелия II не возникают тепловые «возбуждения», и эта часть гелия не обладает запасом внутренней энергии. При абсолютном нуле температуры, когда «элементарных возбуждений» нет, весь гелий II является сверхтекучим и нормальная часть его отсутствует. С ростом температуры растет число «возбуждений» и увеличивается доля нормальной части гелия II. Однако вплоть до температуры 2,19 К в гелии II сохраняется сверхтекучая часть со всеми ее особыми свойствами. При температуре 2,19 К гелий II превращается в гелий I, обладающий обычными свойствами.

¹ Не следует смешивать тепловое движение атомов с «нулевыми колебаниями» этих атомов, имеющими специфическую квантовую природу.