АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ[1].

В. Х. Кеезом, Лейден.

Благодаря чрезвычайно малой величине своих внутренних сил гелий, открытый в солнечной хромосфере в 1868 г. и полученный из земных источников Рамзаем в 1895 г., представляет собой вещество, приближающееся к идеальным газам гораздо более, чем какое бы то ни было другое из известных нам веществ. Он представляет собой термометрический газ par excellence, ибо его чрезвычайно низкая критическая температура и точка кипения позволяют понизить шкалу температур почти вплоть до абсолютного нуля.

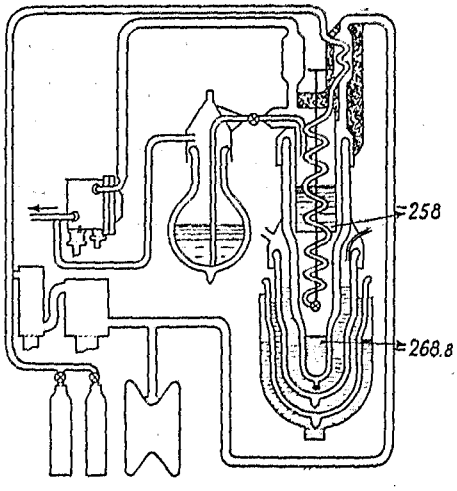

Рис. 1.

Первыми исследователями, пытавшимися получить жидкий гелий, были Дьюар и Ольшевский. Метод, которым они пользовались — охлаждение газа жидким водородом и последующее его расширение, — оказался недостаточным, и полного успеха в этом направлении удалось добиться лишь в 1908 г. Камерлинг-Оннесу, который прибегнул к помощи приема, применявшегося за 10 лет до этого Дьюаром при ожижении водорода. На рис. 1 показана схема такого аппарата. Гелий из бомб нагнетался в охладитель, где он охлаждался сначала при помощи водородного пара, а затем — жидкого водорода, кипящего под уменьшенным давлением при —258° C. После этого охлажденный гелий пропускался

[1] Из лекции, прочитанной перед V Международным конгрессом по холодильному делу в Риме 13 апреля 1928 г., Nature, *122*, 847, 1928.

в змеевик, подвергался там внезапному расширению и в силу явления Джауля-Кельвина частично переходил в жидкое состояние. Впоследствии нижняя часть сосуда для ожижения гелия была несколько видоизменена так, чтобы ее можно было переносить в криостат и производить физические измерения. В последующих опытах, имевших целью получение самых низких температур, Каморлинг-Оннес пользовался целой батареей конденсационных насосов Лэнгмюра, соединенных с целым рядом мощных механических насосов. Для того чтобы решить вопрос о переходе гелия при таких крайне низких температурах в твердое состояние, он помещал в дьюаровском сосуде с жидким гелием маленький металлический цилиндр, который при помощи длинного стержня мог перемещаться в вертикальном направлении.

Все эти опыты показали, что в то время как водород кипит при 20° К и под уменьшенным давлением делается твердым уже при 10°, гелий, имеющий температуру кипения 4,2°, не затвердевает даже при температуре, лежащей чуть выше 0,8° К. При этой температуре гелий остается в жидком состоянии и под весьма малым давлением его собственного насыщенного пара.

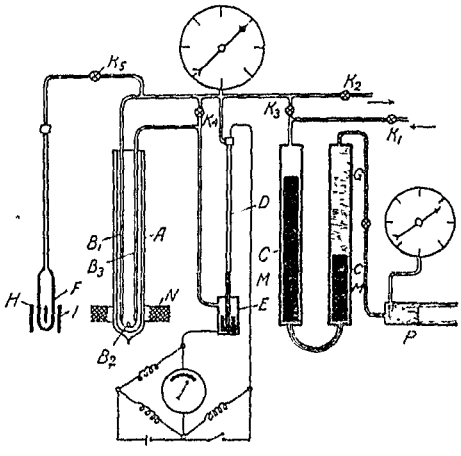

Рис. 2.

Мои опыты, которые позволили получить гелий в твердом виде, совершенно отчетливо показали, что для превращения гелия в твердое состояние требуется не только такая температура, при которой внутриатомные силы преодолевают тепловое движение настолько, чтобы атомы могли группироваться в кристаллическую решетку, но требуется кроме того и воздействие внешнего давления, которое должно быть достаточно высоким для того, чтобы привести в действие внутриатомные силы. Без применения такого давления гелий остается жидким даже при самих низких из достигнутых температур, хотя при некоторой температуре он может внезапно переходить в новое жидкое аггрегатное состояние.

Аппарат, применявшийся в этих опытах, схематически показан на рис. 2. Нижние концы двух металлических трубок B_1 и B_3, соединенные более узкой трубкой, были погружены в жидкий гелий; в этих трубках и производилось сжатие гелия при помощи малого гидравлического пресса, наполненного глицерином. При выдвигании поршня P ртуть, налитая с таким расчетом, чтобы она до половины заполняла два остальных цилиндра C, поднимается в правом цилиндре и увлекает за собой

гелий из запасного сосуда через кран K_1 в левый цилиндр. Затем кран K_1 закрывается, и при помощи поршня P гелий нагнетается через кран K_3 в систему трубок. Для того чтобы можно было установить факт перехода гелия в твердое состояние, эти трубки сообщались с ветвями дифференциального манометра, состоящего из стальной трубки D, нижний конец которой находится в стальной же камере E с некоторым количеством ртути. Если в нижней части трубок B_3 имеет место образование пробки из твердого гелия и если при закрытом кране K_1 кран K_2 на мгновение открыть, то некоторое количество газообразного гелия выходит вон, давление в правой части трубки B_3 становится ниже, чем в левой, и ртуть в стальной трубке дифференциального манометра поднимается. Эта трубка содержит тонкую платиновую проволоку, включенную в одну из ветвей мостика цигстона, так что поднятие ртути влечет за собой отклонение стрелки гальванометра. Другой способ, который был введен позже и который был предложен Кюненом (Kuenen), состоит в том, что в стеклянной трубке F, соединяющейся с остальной частью аппарата металлической трубкой, находится стерженек из мягкого железа H, который может подниматься и опускаться при помощи магнита; стеклянная трубка F в действительности находилась в гелиевом криостате, который для простоты на рисунке не обозначен.

Изменяя температуру гелиевой бани при помощи изменений давления над жидким гелием и определяя давление, необходимое для того, чтобы имело место закупоривание трубки с гелием, можно было получить кривую плавления для гелия для давлений от 25 до 140 атмосфер и для температур от 1,2° до 4,2° К. Оказывается, что эта кривая плавления в ее нижней части становится почти параллельной оси температур и не показывает никакой тенденции к пересечению кривой упругости пара в тройной точке, так что одновременное существование твердой и газообразной фазы представляется невозможным (ниже критической температуры гелия).

Опыты, сделанные со стеклянной трубкой, не обнаружили изменений ни в объеме, ни в состоянии, ни в поверхности раздела как между газом и жидкостью, так и между жидкостью и твердой фазой. Тем не менее присутствие твердого гелия можно было считать доказанным и в этом случае, поскольку пробку из такого гелия можно было ощущать при помощи железного стерженька. Совершенно очевидно, что при соответствовавших этому случаю давлениях (около 90 атмосфер) плотности и показатели преломления для всех трех фаз являются почти одинаковыми.

В целом ряде опытов с измерением диэлектрической постоянной жидкого гелия, которые велись совместно с проф. Вольфке из Варшавы, удалось заметить, что эта константа претерпевает внезапное или во всяком случае очень быстрое изменение величины при температуре 2,3° К, совпадающей с той температурой, при которой Камерлинг-Оннес и Бокс наблюдали максимальную величину для плотности жидкости.

Отсюда можно заключить, что существуют две модификации жидкого гелия, именно — жидкий гелий I, устойчивый при температурах выше 2,3°, и жидкий гелий II, устойчивый при более низких температурах; плотность первого примерно на 0,1 % выше, чем плотность последнего.

Дана (Dana) и Камерлинг-Онесом были проделаны измерения удельной теплоты жидкого гелия, которые, однако, не были опубликованы, так как слишком высокие ее величины при температурах около 2,3° казались несогласными с другими данными. Это расхождение повидимому зависит от теплоты превращения гелия I в гелий II, которая по вычислениям оказывается —0,13 $\frac{кал.}{г}$. Внезапное изменение происходит и в теплоте парообразования, причем для гелия II ее величина больше, чем для гелия I; наоборот, поверхностное натяжение гелия I на 3 % превышает соответствующую величину у гелия II. Надо заметить, что это превращение происходит при такой температуре, которая, в смысле закона соответственных состояний Ван дер Ваальса, аналогична температурам плавления других веществ.

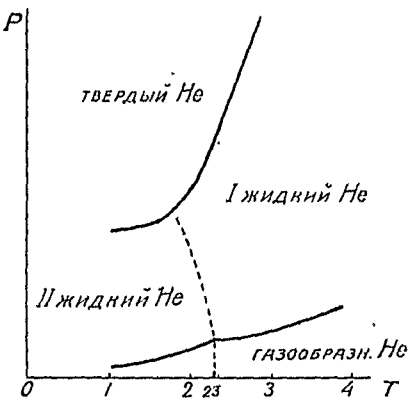

Рис. 3.

Таким образом у гелия имеется тройная точка: жидкий гелий I — жидкий гелий II — пар. До настоящего времени такая тройная точка наблюдалась только у некоторых веществ сложного состава, обнаруживающих мезоморфное состояние (т. е. у жидких кристаллов); имеет ли это место и в случае гелия, могут показать только дальнейшие исследования. Рис. 3 представляет собой диаграмму различных состояний гелия; на ней показаны кривая упругости насыщенного пара, тройная точка и кривая точек плавления. Между жидким гелием I и жидким гелием II должна находиться кривая перехода, но пока еще остается неизвестным, пересекает ли она кривую точек плавления, как это показано на диаграмме, или загибается к оси давлений.