

5. Изменение температуры газа при бесконечно малом адиабатическом дросселировании, т. е. при изменении давления газа в дросселе на малую величину $dp < 0$, называют дифференциальным эффектом Джоуля — Томсона. Можно показать, что для газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, изменение температуры

$$dT = \frac{1}{C_p} \cdot \frac{\frac{2a(V_\mu - b)^2}{RTV_\mu^2} - b}{1 - \frac{2a(V_\mu - b)^2}{RTV_\mu^3}} dp, \quad (13.29)$$

где C_p — молярная теплоемкость газа в изобарическом процессе. В частности, для идеального газа $a = b = 0$ и $\frac{dT}{dp} = 0$, т. е. эффект Джоуля — Томсона отсутствует.

Знак дифференциального эффекта Джоуля — Томсона, т. е. знак производной $\frac{dT}{dp}$, зависит для данного газа от значений давления p и температуры T газа перед дросселем. Температуру T , при которой дифференциальный эффект Джоуля — Томсона равен нулю ($\frac{dT}{dp} = 0$), называют температурой инверсии. Из формулы (13.29) следует, что для газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, температуру инверсии $T_{ин}$ можно определить из уравнения

$$\sqrt{\frac{bRT_{ин}}{2a}} = \frac{2}{3} \pm \sqrt{\frac{1}{9} - \frac{b^2}{3a}} p. \quad (13.30)$$

Из (13.30) видно, что инверсия возможна лишь в пределах изменения давления от нуля до $p_{\max} = \frac{1}{3} \frac{a}{b^2} = 9p_k$ (p_k — критическое давление). При $p = p_{\max}$ $T_{ин} = \frac{8}{9} \cdot \frac{a}{bR} = 3T_k$ (T_k — критическая температура). Максимальное и минимальное значения температуры инверсии достигаются при $p = 0$:

$$(T_{ин})_{\max} = \frac{2a}{bR} = \frac{27}{4} T_k \quad \text{и} \quad (T_{ин})_{\min} = \frac{2a}{9bR} = \frac{3}{4} T_k.$$

§ 13.5. Сжижение газов и получение низких температур

1. В § 13.3 было показано, что сжижение газа путем изотермического уменьшения его объема возможно только в том случае, когда его температура ниже критической. Поэтому задача сжижения газов неразрывно связана с разработкой методов их сильного охлаждения, т. е. получения низких температур. Рассмотрим некоторые из этих методов.

2. Известно, что для поддержания кипения жидкости к ней нужно непрерывно подводить теплоту. Поэтому кипящие жидкости способны охлаждать окружающие тела, находящиеся с ними в тепловом контакте. Это явление было использовано Р. Пикте для получения низких температур. Сначала какой-либо газ, критическая температура которого выше комнатной (например, аммиак, $T_k = 405,5 \text{ K}$), переводят в жидкое состояние путем изотермического сжатия. Затем понижают давление и жидкость кипит. Теплоту, необходимую для поддержания кипения, сообщает другой газ, критическая температура которого выше температуры кипения аммиака, но ниже его критической температуры. При этом второй газ охлаждается ниже его критической температуры. Поэтому при изотермическом сжатии он может быть переведен в жидкое состояние. Аналогично поступают дальше, постепенно сжижая один газ за другим. Однако из-за отсутствия газов с нужными критическими температурами этот метод не позволяет получить температуру ниже 63 K .

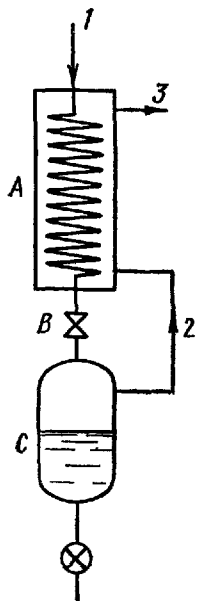


Рис. 13.9.

3. Метод Дьюара — Линде основан на использовании положительного эффекта Джоуля — Томсона. Схема установки приведена на рис. 13.9. Газ, сжатый до высокого давления и охлажденный до комнатной температуры, поступает по трубопроводу 1 в теплообменник А¹. В вентиле В газ адиабатически дросселируют до давления, близкого к атмосферному. При этом он охлаждается. Если понижение температуры недостаточно для сжижения газа, то его по трубопроводу 2 возвращают в теплообменник А, где он охлаждает новые порции сжатого газа и выбрасывается через трубопровод 3. Таким образом, постепенно понижается температура газа за вентилем В, пока, наконец, не начнется сжижение газа. Сконденсированный газ собирается в сосуде С.

4. Третий метод основан на охлаждении газов при совершении ими полезной работы расширения в адиабатическом процессе. Холодильные машины, основанные на этом принципе, называют **детандерами**. По своей конструкции детандеры делятся на поршневые и турбинные. В первых газ расширяется в цилиндре с подвижным поршнем, а во вторых — в турбине. Турбодетандеры, в создании которых большую роль сыграл академик П. Л. Капица, являются наиболее производительными, экономичными и компактными типами холодильных установок.

5. Благодаря интенсивному испарению гелия при низких давлениях удалось получить температуру порядка $0,7 \text{ K}$. В настоящее время

¹ Теплообменником называется устройство, служащее для нагревания или охлаждения протекающего через него газа или жидкости

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.