

#### 4.4. Получение низких температур и сжижение газов.

В этом параграфе кратко рассмотрим условия и способы сжижения газов (подробнее о получении низких температур см в книгах, в частности в курсе физики Д.В. Сивухин, том 2 §105).

Сжижение газов достигается при температуре ниже  $T_{кр}$  при сжатии газа. Однако существует много газов, у которых критическая температура меньше комнатной. Следовательно, эти газы нельзя перевести в жидкое состояние путем сжатия при комнатной температуре. К таким газам, например, относятся:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $He$ . В таблице ниже представлены характерные температуры для этих газов:  $T_i$  – температура инверсии (если  $T_i$  больше комнатной, то наблюдается положительный эффект Джоуля-Томсона),  $T_{кр}$  – температура, при которой исчезает различие между жидкостью и газом, и температура кипения жидкости  $T$  при нормальном давлении.

Газ	$T_i$ (K)	$T_{кр}$ (K)	$T$ (кипения при 1 атм) (K)
кислород $O_2$	1063	154.4	90.1
азот $N_2$	~850	126.1	77.32
водород $H_2$	200	33.3	20.4
гелий $He$	50	5.3	4.21

Для сжижения таких газов необходимо получить сначала низкие температуры, ниже  $T_{кр}$ , а потом при необходимости применить сжатие.

Существует 3 основных метода получения низких температур:

- 1) испарение жидкостей (холодильные машины, в том числе домашние холодильники),
- 2) эффект Джоуля-Томсона при температуре меньше  $T_i$  (см пункт 4.3.2),
- 3) обратимое адиабатическое расширение газов с совершением внешней работы (см пункт 4.3.3).

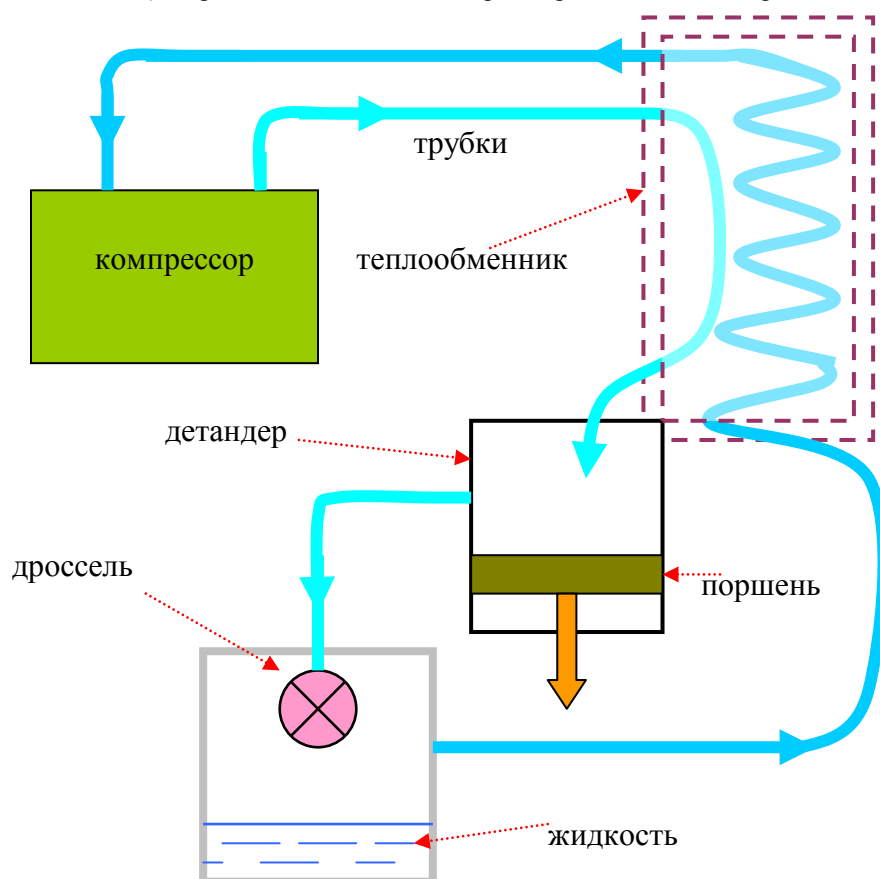


Рис. 4.1.

Для получения низких температур и непрерывного сжижения газов созданы специальные циклы, которые используют комбинированные методы.

Машина Карла Линде использовала эффект Джоуля - Томсона. Пористую перегородку заменяли узким отверстием (дросселирование). В общих чертах схема действия машины Линде состоит в следующем. Сжатый компрессором газ охлаждается проточной водой, проходит через дроссельный вентиль, при этом охлаждается за счет эффекта Джоуля - Томсона и поступает в противоточный теплообменник, охлаждая при этом новый сжатый газ, который поступает в дроссель и т.д.

*Детандеры* (см схему на рис. 4.1 и также подобные схемы в учебниках) – это машины, которые используют адиабатическое расширение (для совершения работы и охлаждения) и эффект Джоуля – Томсона. Однако в детандерах существует проблема смазки,

обычная смазка при низких температурах неэффективна.

Метод Клода (французский инженер) (см схемы в учебниках). Клод использовал для смазки прокладки из сухой кожи. П.Л. Капица (1934) внес существенный вклад в решение этой проблемы: он использовал воздушный зазор вместо смазки трущихся поверхностей, а вместо поршня детандера использовал турбину. Отсюда название машин – *турбодетандеры*.

Циклы, описанные выше, предназначены для непрерывного сжижения газов. Более простые способы получения сжиженных газов – однократное адиабатическое расширение сжатого газа. Сжатый газ подвергался сначала предельно возможному предварительному охлаждению, а затем адиабатически расширялся. Р.П. Пикте первым получил жидкий азот, затем одновременно с Кальете получил жидкий кислород в 1877 году.

Однако способ однократного адиабатического расширения не всегда сопровождается успехом. Так, Л.П. Кальете в 1877 году пытался получить сжижение воздуха, а смог наблюдать только кратковременное появление тумана, состоящего из мельчайших капелек жидкости. Имея в распоряжении сжиженный газ, можно добиться дальнейшего понижения температуры, заставляя жидкость кипеть под пониженным давлением. Этим воспользовались польские ученые С. Врублевский и К. Ольшевский, впервые получившие жидкий кислород. В 1895 году Ольшевский первым сконденсировал жидкий аргон, сумел получить также жидкий азот и водород, однако не смог сохранить последний в сжиженном состоянии.

Жидкий водород был впервые получен в 1898 г. Дж. Дьюаром непрерывным способом в Лондонском Королевском институте. Им был использован эффект Джоуля — Томсона. Сжатый до высокого давления водород предварительно охлаждался ниже температуры инверсии в змеевике, погруженном в жидкий воздух, кипящий под пониженным давлением, а затем подвергался дросселированию.

Жидкий гелий был получен в 1908 г. Г. Камерлингом – Оннесом с сотрудниками в Лейденском университете. И только в 1932 г. Ф. Симон получил жидкий гелий однократным адиабатическим расширением. Температура кипения обычного гелия ( $^4\text{He}$ ) при нормальном давлении равна 4,2 К. Заставляя  $^4\text{He}$  кипеть под пониженным давлением, можно достигнуть температуры 0,7–1 К. Для получения температур ниже 1 К употребляют ванны с жидким  $^3\text{He}$ , который имеет более низкую температуру кипения (3,2 К). Откачивая ванну с жидким  $^3\text{He}$ , удается понизить температуру до 0,3 К. При определённых условиях жидкий гелий представляет собой квантовую жидкость, то есть жидкость, в макроскопическом объёме которой проявляются квантовые свойства составляющих её атомов. Из-за квантовых эффектов (нулевые колебания), при нормальном давлении гелий не затвердевает даже при абсолютном нуле. Твёрдый гелий в  $\alpha$ -фазе удастся получить лишь при давлении выше 25 атм.

Абсолютный нуль по шкале Кельвина (0 К) соответствует  $-273,15^\circ$  по шкале Цельсия или  $-459,67^\circ$  по шкале Фаренгейта. Сверхнизкие рекордные температуры получаются при адиабатическом размагничивании парамагнитных солей. Рекорд в настоящее время достигает температуры  $\sim 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}$ .

Самая низкая температура,  $2 \cdot 10^{-9} \text{ K}$  (двухбillionная часть градуса) выше абсолютного нуля, была достигнута в двухступенчатом криостате ядерного размагничивания в Лаборатории низких температур Хельсинкского технологического университета, Финляндия, группой учёных под руководством профессора Олли Лоунасаа, о чём было объявлено в октябре 1989 г. Он также экспериментально обнаружил, что гелий-3 может становиться *сверхтекучим*.

*Примечание 1. Карл Пауль Готфрид фон Линде, немецкий инженер, 1842-1934;*

*Петр Леонидович Капица, советский физик, 1894–1986, окончил политехнический институт в 1918г., работал на кафедре экспериментальной физики Политехнического института в 1918-1921г.г., Нобелевская премия 1978г. за фундаментальные исследования в области физики низких температур.*

*Рауль-Пьер Пикте, швейцарский физик, 1846-1929*

*Луи-Поль Кальете, французский физик, 1832–1913.*

*Сигизмунд Флорентий Врублевский, польский физик и химик, 1845—1888*

*Кароль Станислав Ольшевский, польский физик и химик, 1846–1915*

*Джеймс Дьюар, шотландский физик и химик, 1842-1923.*

*Гейке Камерлинг-Оннес, нидерландский физик, 1853–1926, Нобелевская премия 1913г. за обнаружение сверхпроводимости*

*Франц Ойген Симон, немецкий и британский физик-экспериментатор, 1893–1956, крупный специалист в области физики низких температур*

*Олли Виктор Лоунасаа, финский физик, 1930-2002.*