

факте (т. е. при дросселировании — пропускании газа через пористую перегородку, кран, вентиль), изотропич. расширении газа с совершением внеш. работы в детандере и при выпуске газа из сосуда пост. объёма (выхлоп). Процесс дросселирования необратим, идёт с возрастанием энтропии по закону:  $H = \text{const}$ . Инверсионная темп-ра всех газов (темп-ра, при к-рой положит. эффект Джоуля — Томсона становится отрицательным и газ начинает нагреваться), кроме  $H_2$ ,  $He$  и  $Ne$ , на сотни градусов выше темп-ры окружающей среды, и поэтому они могут быть охлаждены и сжижены простым дросселированием. Инверсионные темп-ры  $H_2$ ,  $He$  и  $Ne$  значительно ниже комнатных, поэтому их предварительно охлаждают ( $H_2$  и  $Ne$  — жидким азотом,  $He$  — жидким водородом).

Термодинамически наиб. эффективен метод С. г. с помощью детандера; этот метод в пром. установках является основным. В поршневых детандерах сжатый газ движет поршень и охлаждается, в турбодетандерах — вращает турбину. В большинстве случаев после детандера газ дополнительно охлаждают дросселированием. Процесс расширения газа в детандере:  $S = \text{const}$ .

На рис. 2 приведены типовая схема установки для С. г. (а) и  $T - S$ -диаграмма (б) термодинамич. процесса в ней. После сжатия в компрессоре (1—2) и предварит. охлаждения в теплообменнике (2—3) поток сжатого газа делится на два: поток  $M$  отводится в детан-

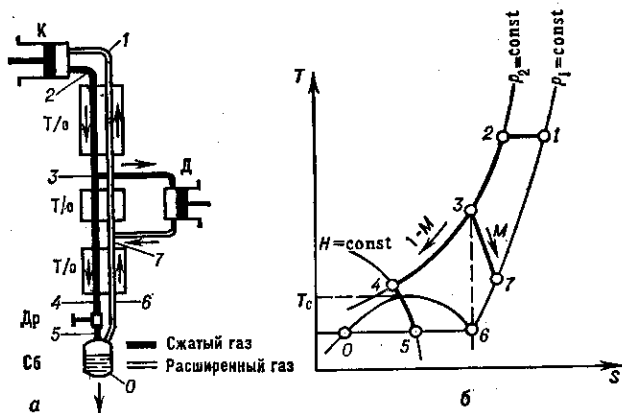


Рис. 2. Схема установки сжижения газов (а) и её  $T - S$ -диаграмма (б); К — компрессор, Д — детандер, Т/о — теплообменники, Др — дроссель, Сб — сборник.

дер, где, расширяясь, производит работу, охлаждается (3—7) и охлаждает вторую часть сжатого газа 1 —  $M$ , к-рый затем дросселируется и сжимается. Теоретически расширение газа в детандере должно протекать при пост. энтропии (3—6), однако в результате разл. потерь реально идёт процесс 3—7. В крупных установках С. г. применяют неск. детандеров, работающих в разных температурных интервалах. Спец. устройство позволяет получать сжиженный газ непосредственно в самом детандере и обходиться без дроссельной ступени.

Для сжижения небольших кол-в газа используются криогенно-газовые машины, представляющие собой комбинацию компрессора, теплообменного аппарата и детандера. С помощью таких машин получают темп-ры до 10 К, т. е. достаточно низкие для сжижения всех газов, кроме гелия (для сжижения гелия пристраивается дополнит. дроссельная ступень). В небольшом объёме С. г. может производиться при охлаждении испаряющейся жидкостью с более низкой (чем получаемая) темп-рой кипения. Так, с помощью жидкого азота можно сжигать кислород, аргон, метан и др. газы, с помощью жидкого водорода — неон. Такой процесс энергетически невыгоден и применяется только в лаб. условиях.

Подвергаемые сжижению газы должны быть очищены от примесей, к-рые имеют тем-ру замерзания более высокую, чем в цикле сжижения данного газа, и, затвердевая, могут закупорить теплообменную аппаратуру. Сжижение газов ( $N$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ , природного газа и др.) — крупная отрасль хим. пром-сти.

Лит.: Справочник по физико-техническим основам криогеники, под ред. М. П. Малюкова, 3 изд., М., 1985; Фрадков А. Б., Что такое криогеника, М., 1991.

А. Б. Фрадков.

**СЖИМАЕМОСТЬ** — способность вещества изменять свой объём под действием всестороннего давления. С. обладают все вещества. Если вещество в процессе сжатия не испытывает хим., структурных и др. изменений, то при возвращении внеш. давления к исходному значению нач. объём восстанавливается. Именно обратимое изменение занимаемого веществом объёма  $V$  под равномерным гидростатич. давлением  $p$  и наз. обычно С. (объёмной упругостью). Величину С. характеризует коэф. С.  $\beta$ , к-рый выражает уменьшение единичного объёма (или плотности  $\rho$ ) тела при увеличении  $p$  на единицу:

$$\beta = -\frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta p} \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \right),$$

где  $\Delta V$  и  $\Delta \rho$  — изменения  $V$  и  $\rho$  при изменении  $p$  на величину  $\Delta p$ .  $K = 1/\beta$  — модуль объёмной упругости (модуль объёмного сжатия, объёмный модуль); для твёрдых тел

$$K = EG/3(3G - E),$$

где  $E$  — модуль Юнга (см. Модули упругости),  $G$  — модуль сдвига. Для идеальных газов  $K = p$  при любой темп-ре  $T$ . В общем случае С. вещества, а следовательно,  $K$  и  $\beta$  зависят от  $p$  и  $T$ . Как правило,  $\beta$  убывает при увеличении  $p$  и растёт с  $T$ . Часто С. характеризуют относит. плотностью  $\sigma = \rho/\rho_0$ , где  $\rho_0$  — плотность при  $T = 0^\circ C$  и  $p = 1$  атм.

Сжатие может происходить как при пост.  $T$  (изотермически), так и с одноврем. разогревом сжимаемого тела (напр., в адиабатном процессе). В последнем случае значения  $K$  будут большими, чем при изотермич. сжатии (для большинства твёрдых тел при обычной  $T$  на неск. %).

Для оценки С. веществ в широком диапазоне  $p$  используют уравнения состояния, выражающие связь между  $p$ ,  $V$  и  $T$ . Определяют С. непосредственно по изменению  $V$  под давлением (см. Пневмометр), из акустич. измерений скорости распространения упругих волн в веществе. Эксперименты в ударной волне позволяют установить зависимость между  $\rho$  и  $p$  при максимальных экспериментально полученных давлениях. С. находят также из измерений параметров кристаллич. решётки под давлением, производимых методами рентгеновского структурного анализа. С. можно определить измеряя линейную деформацию твёрдого тела под гидростатич. давлением (по т. в. линейной С.). Для изотропного тела коэф. линейной С.

$$\frac{1}{L} \left( \frac{\Delta L}{\Delta p} \right) \approx \frac{1}{3} \beta,$$

где  $L$  — линейный размер тела.

С. газов, будучи очень большой при  $p < 1$  кбар, по мере приближения их плотности к плотности жидкостей становится близкой к С. жидкостей. Последняя с ростом  $p$  уменьшается сначала резко, а затем меняется весьма мало: в интервале 6—12 кбар уменьшается примерно так же, как в интервале от 1 атм ( $10^{-3}$  кбар) до 1 кбар (примерно в 2 раза), при 10—12 кбар составляет 5—10% от нач. значения. При 30—50 кбар модули  $K$  жидкостей по порядку величины близки к  $K$  твёрдых тел. Для твёрдых тел при 100 кбар  $\Delta\rho/\rho_0 \approx 15$ —25%. Для отд. веществ, напр. для щелочных металлов,  $\Delta\rho/\rho_0 \sim 40\%$ , для большинства др. металлов 6—15%. Линейная С. анизотропных веществ зави-