66.071.6/.7

К ВОПРОСУ О РАЗДЕЛЕНИИ ГАЗОВ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕМ*)

Ю. Б. Харитон

Как нетрудно видеть, разделение газов центрифугированием может быть проведено обратимым путем. Поэтому этот метод принципиально является наиболее экономичным. Для обратимого получения 1 m^3 чистого кислорода и 4 m^3 азота при нормальных условиях требуется

^{*)} Воспроизводится по ЖТФ 7 (14), 1476 (1937).

приблизительно 0,09 квт. час, величина намного меньшая, чем та, которая получается в наиболее совершенных современных установках.

Наличие соответствующих английских и французских патентов *), а также указания в технических журналах **) производят на первый взгляд впечатление, что метод центрифугального разделения начинает выходить на широкую техническую дорогу. Мы не будем здесь давать детальную оценку этих материалов. Это заняло бы много места, а главное, было бы совершенно бесцельным. Результаты проводимых ниже вычислений с несомненностью показывают, что эти материалы являются либо неграмотной фантазией, либо просто технической фальшивкой,

В настоящей заметке мы покажем, что рассматриваемый метод практически совершенно непригоден в тех случаях, когда приходится иметь дело со сколько-нибудь крупными массами газа, т. е. в наиболее интересных с энергетической точки зрения процессах. Эта непригодность является главным образом следствием медленности процесса диффузии.

В первый момент порция смеси газов, попавшая в центрифугу, распределяется по объему в соответствии с потенциалом центробежной силы и со средним молекулярным весом смеси. Это распределение устанавливается почти мгновенно, точнее, за время, по порядку равное отношению радиуса центрифуги к скорости звука в данной смеси. Распределение выражается известной формулой

$$\overline{\rho} = \overline{\rho_0} e^{\frac{\overline{\mu}(\omega r)^2}{2RT}}$$

 $(\rho_0$ и ρ — плотности смеси газов на оси центрифуги и на расстоянии rот оси, ω — угловая скорость центрифуги, R — газовая достоянная, T — абсолютная температура, μ — средний молекулярный вес смеси). Затем уже начинается собственно процесс разделения смеси на компоненты с различными молекулярными весами.

Для того чтобы процесс разделения действительно имел место, необходима полная ламинарность движения газа; значит, газ не может приводиться во вращение лопаточным ротором внутри неподвижного цилиндра; цилиндр сам должен вращаться. Для цилиндра из стали с прочностью 100 кГ/мм² линейная скорость 350 м/сек будет давать напряжение, граничащее с разрывным. Будем считать, что такая скорость возможна. Тогда в случае центрифугирования воздуха, если последний вводится вблизи оси центрифуги, равновесный состав у периферии цилиндра будет содержать несколько меньше 22% кислорода. Для получения смеси с содержанием кислорода 40% понадобится 12 ступеней обогащения. (Изменение C отношения концентраций двух газов вычисляется с помощью выражения

$$C = e^{\frac{(\mu_1 - \mu_2)V_0^2}{2RT}},$$

где μ_1 и μ_2 — молекулярные веса, V_0 — линейная скорость периферии цилиндра, R — газовая постоянная и T — абсолютная температура.)

Вычислим теперь скорость разделения, являющуюся ахиллесовой пятой рассматриваемого метода (будем опять считать, что смесь газов, например, воздух, подводится к оси центрифуги и соответственно уплотняется у периферии).

Через $1 cm^2$ воображаемого цилиндра радиуса r, коаксиального с центрифугой, за 1 сек проходит по направлению к оси количество газа

^{*)} Edoardo M a z z a, Fr. 756239, Dec. 1933; Brit. 423003, Jan. 1935. **) J. R a b u, L'Industrie Chim. 22, 896 (1935).

(диффузионный поток) $\alpha\left(\frac{\partial\rho}{\partial r}\right)$ (α — коэффициент диффузии, ρ — парциальная плотность интересующего нас газа на расстоянии r от оси). От оси к периферии через тот же 1 $c M^2$ проходит под действием инерционных сил количество газа (силовой поток) $K u \rho$ (K — коэффициент пропорциональности, u — центростремительное ускорение). Результирующий поток (без учета обратной диффузии азота, что мало отразится на результатах)

$$q = Ku\rho - \alpha \frac{\partial \rho}{\partial r}$$
.

Коэффициент K может быть вычислен из условия, что при установившемся равновесии, т. е. когда $\rho = \rho_0 e^{\mu(\omega r)^2/2RT}$ (ρ_0 — плотность кислорода на оси центрифуги и μ — его молекулярный вес), результирующий поток q равен 0. Отсюда получаем $K = \frac{\alpha\mu}{RT}$. В начальный момент ρ пропорционально $\overline{\rho}$ (состав газа еще не изменился); поэтому

$$q_{\text{\tiny Hall}} = Ku\rho - \alpha \left(\frac{\partial \rho}{\partial r}\right) = \frac{\alpha \mu}{RT} \, \omega^2 r \rho_0 e^{\frac{\overline{\mu}(\omega r)^2}{2RT}} - \alpha \frac{\overline{\mu}\omega^2 r}{RT} \, \rho_0 e^{\frac{\overline{\mu}(\omega r)^2}{2RT}} = \frac{\alpha \omega^2 r}{RT} \, \rho_0 e^{\frac{\overline{\mu}(\omega r)^2}{2RT}} (\mu - \overline{\mu}).$$

По мере хода центрифугирования $\mu-\mu$ уменьшается так, что начальный поток является в то же время максимальным потоком q_m . Переходя к потоку через всю поверхность центрифуги и полагая $r=R_0$, где R_0 — радиус центрифуги, получим максимальное (соответствующее бесконечно малому обогащению) значение потока сепарируемого газа

$$Q_{m} = 2\pi R_{0} l q_{m} = \frac{2\pi l \alpha V_{0}^{2}}{RT} \rho_{0} e^{\frac{\overline{\mu} V_{0}^{2}}{2RT}} (\mu - \overline{\mu}) = \frac{2\pi l \alpha_{0} V_{0}^{2}}{RT} \rho_{0} (\mu - \overline{\mu}),$$

где V_0 — линейная скорость на периферии центрифуги, l — длина центрифуги и α — коэффициент диффузии рассматриваемого газа в смеси при исходном давлении (коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности смеси). Полагая для случая разделения воздуха на азот и кислород $\mu=32$ и $\mu=28.8$, беря для линейной скорости обоснованную выше величину $V_0=3.5\cdot 10^4$ см/сек и принимая $R=8.3\cdot 10^7$ $\frac{pp}{zpa\partial\cdot моль}$, $T=300^\circ$ K и $\alpha_0=0.18$ см²/сек, получим $Q_m=0.2l\rho_0$ *). Инач еговоря, сепаратор длиною 1 м при окружной скорости 350 м/сек будет давать приблизительно 0.005 г избыточного кислорода в секунду, или 100 г в час, при бесконечно малом обогащении. Того же порядка цифра получится для азота. Значит, для азотного завода на 100 m связанного азота в сутки потребуется установить центрифуги общей длиной в несколько сотен κm .

Для случая конечного обогащения цифра еще уменьшается. Несколько лучшие, но в общем столь же неутешительные результаты получаются для случая выделения чистого водорода из различных смесей.

Полученный результат показывает, что для азотной промышленности или же для постановки кислородного дутья в доменных печах и т. п. применений, требующих огромных количеств газа, центрифугальные сепараторы применять нерационально. В тех же случаях, когда требуется получение сравнительно небольших количеств газа, центрифугальный сепаратор может иметь некоторые применения.

Ленинградский институт химической физики Поступило в редакцию 22 мая 1937 г.

^{*)} Фактически Q_m не зависит от ρ_0 поскольку, как отмечено выше, α_0 обратно пропорционально ρ_0 . (Прим. при корр. УФН.)