

где D_{13} , D_{23} — коэф. диффузии изотопов в 3-й газ. В качестве него используют пары, к-рые можно затем легко сконденсировать и отделить от смеси изотопов. Умножение элементарного эффекта возможно при увеличении потока пара. Процесс можно проводить в каскадах разделительных насосов (Герц) или в противоточных цилиндрич. колоннах (рис. 2).

Газ, обогащенный Разделяе — легким изотопом мая газовой смеси

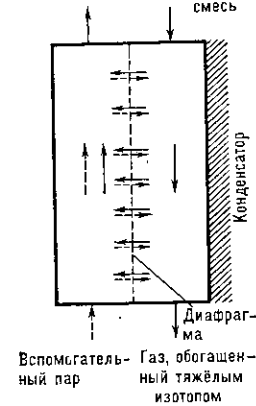


Рис. 2. Масс-диффузионная колонна.

предотвращения перемешивания обогащенной и обедненной смеси и для создания регулируемых извне вертикальных потоков газа. Т. о., первичный эффект И. р. возникает при диффузии смеси в радиальном потоке пара. Противоточное движение в вертикальном направлении переводит радиальный эффект И. р. в осевой и обеспечивает умножение эффекта, зависящее от высоты колонны [3].

Термодиффузия. Перепад тем-ры в газе или жидкости вызывает диффузию, приводящую к частичному И. р. Если поток, вызванный термодиффузией, уравновешивает противоположным ему потоком, обусловленным диффузией, то первичный коэф. обогащения определяется ф-лой:

$$\epsilon_0 = \alpha_T \ln(T_1/T_2), \quad (6)$$

где α_T — постоянная термодиффузии, зависящая от характера межмолекулярного взаимодействия и относит. разности масс молекул. В большинстве газовых смесей в холодной области возрастает концентрация тяжёлого газа, в горячей — лёгкого. Для умножения обычно малого первичного эффекта применяется противоточная термодиффузионная колонна, состоящая из охлаждаемой снаружи вертикальной трубки, внутри к-рой помещается нагреваемая металлич. нить или трубка меньшего диаметра (рис. 3). Разность тем-р вызывает непрерывно идущее поперечное термодиффузионное разделение и одновременно создаёт вертикальную конвекцию газовой смеси: лёгкий изотоп, обогащаемый около нагретой трубки (T_1), уносится восходящим конвективным потоком к верхнему концу колонны, а тяжёлый — увлекается вниз.

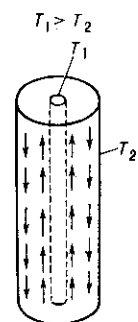


Рис. 3. Термодиффузионная колонна с кольцевым зазором.

При достаточной длине колонны можно достичь почти полного разделения смеси.

Методом термодиффузии получены изотопы (концентрация > 99%): ^3He , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{35}Cl , ^{37}Cl , ^{38}Ar , ^{84}Kr , ^{86}Kr , ^{136}Xe [4, 5]. Термодиффузия в жидком UF_6 применялась в США для обогащения природного урана изотопом ^{235}U до концентрации 1%. Для промышл. И. р. метод термодиффузии неэффективен.

Электролиз воды. При электролизе воды или водных растворов электролитов скорость электролиза D_2O меньше, чем H_2O . В результате в электролите растёт концентрация D ($\alpha=6-8$). Электролиз воды был первым промышл. методом получения D_2O (электролизный завод в Норвегии в 40-х гг. производил тонны D_2O в год). Для получения чистой D_2O применяют электролитич. каскад из 15 ступеней в сочетании с изотопным обменом (см. ниже) на первых 3 ступенях. Электролиз требует значит. затрат электроэнергии (на 1 кг D_2O 125000 кВт·ч). Электролиз можно применять для отделения Т от Н ($\alpha=14$). Для др. элементов электролиз неэффективен, т. к. $\alpha \approx 1$ [5].

Миграция ионов. При прохождении электрич. тока через электролит (водный раствор, расплав соли) более подвижные ионы концентрируются у катода. Первичный эффект обогащения (для большинства элементов $\epsilon < 10^{-2}$) может быть умножен в противоточных ячейках [3].

Центрифугирование. В центрифуге, вращающейся с большой скоростью, более тяжёлые частицы под влиянием центробежной силы концентрируются у периферии, более лёгкие — у оси ротора. Во вращающемся газе устанавливается равновесное распределение плотности $n = n_0 \exp(M\omega^2 r^2 / 2RT)$, где ω — угловая скорость, r — радиус вращения, n_0 — плотность при $r=0$. В смеси двух идеальных газов с молекулярными массами M_1 и M_2 , помещённой во вращающийся полый цилиндр (ротор), распределение устанавливается для каждого газа независимо. Поэтому макс. коэф. разделения в радиальном направлении:

$$\alpha_0 = \frac{n_1/n_2}{n_{10}/n_{20}} = \exp(\Delta M v^2 / RT), \quad (7)$$

где v — линейная скорость вращения ротора радиуса r_0 . Т. к. α_0 зависит от ΔM , метод наиболее пригоден для И. р. тяжёлых элементов, где ΔM выше.

Для умножения первичного эффекта применяется противоточная циркуляция смеси внутри ротора, преобразующая радиальное обогащение в аксиальное и позволяющая производить отбор обогащенной и обедненной фракций вблизи торцевых крышек ротора. Разделит. мощность центрифуги ограничена макс. теоретич. значением: $\rho D (\Delta M v^2 / 2RT)^2 \pi z / 2$, где ρ — плотность, D — коэф. взаимной диффузии изотопов, z — длина ротора. В разделит. каскадах применяется параллельное соединение центрифуг в ступени.

Центрифуги использовались впервые Линдemanом и Астоном в 1919, в дальнейшем для частичного И. р. Cl, Br, Xe, U. Программы развития метода центрифугирования для обогащения U есть в странах Европы, в США и Японии [2].

Для обогащения ^{235}U используют эффект разделения, создаваемый центробежными силами при искривлении потока UF_6 (разделит. сопло в ФРГ, вихревая трубка в ЮАР). Для увеличения первичного эффекта к UF_6 добавляют лёгкий вспомогат. газ (H_2 или He), увеличивающий скорость UF_6 в потоке смеси. При этом возрастают и действующие на UF_6 центробежные силы и ϵ_0 в 4—8 раз выше, чем в случае газовой диффузии [2, 4].

Физико-химические методы [6]

Ректификация (дистилляция, фракционная перегонка). Метод основан на различии в равновесном изотопном составе жидкой и газообразной фаз. В большинстве случаев в паре концентрируется лёгкий изотоп. Коэф. разделения ϵ можно оценить из полуэмпирич. ур-ния Бигелейзена:

$$\ln \alpha = \frac{A}{24} \left(\frac{h^2}{2\pi kT} \right)^2 \left(\frac{1}{M_1} - \frac{1}{M_2} \right), \quad (8)$$

где A — константа, зависящая от строения молекулы. Эффект разделения умножается в ректификац. колоннах благодаря противоточку фаз. Ректификация применяется для произ-ва обогащенных изотопов лёгких эле-