

ментов ( $D, {}^{10}B, {}^{11}B, {}^{13}C, {}^{15}N, {}^{18}O$ ). Наиб. эффективная низкотемпературная ректификация, напр. в смесях  $H_2-D_2$ ;  ${}^{13}Co-{}^{12}Co$  и др.

**Изотопный обмен** основан на хим. реакциях, при к-рых происходит термодинамически равновесное перераспределение изотопов к.-л. элемента между реагирующими веществами. Так, напр., при контакте  $HCl$  с  $HBr$ , в к-рых первонач. содержание дейтерия в водороде было одинаковым, в результате обменной реакции в  $HCl$  содержание  $D$  будет неск. выше, чем в  $HBr$ . Применение неск. каскадов позволяет получать дейтерий и обогащённые отд. изотопами смеси для др. лёгких элементов ( ${}^6Li, {}^7Li, {}^{10}B, {}^{11}B, {}^{13}C, {}^{15}N, {}^{18}O$ ). Разрабатывается метод обогащения  ${}^{235}U$  с использованием ионообменной реакции между  $U$  в смоле и  $U$  в растворе ( $\epsilon_0=1,5 \cdot 10^{-3}$ ) [2, 4].

Достоинства молекулярно-кинетич. и физ.-хим. методов: возможность экономичного И. р. в промышл. масштабах и практически полное использование вещества в 1 цикле разделения. Недостатки: необходимость газовой фазы (не все элементы образуют стойкие газообразные соединения); значит. кол-во смеси; неуниверсальность установок; разделит. каскады и колонны должны содержать значит. кол-во концентрируемых изотопов.

Лит.: 1) Атомная наука и техника в СССР, М., 1977; 2) Виллани С., Обогащение урана, М., 1983; 3) Розен А. М., Теория разделения изотопов в колоннах, М., 1960; 4) Шемля М., Черье Ж., Разделение изотопов, пер. с франц., М., 1980; 5) Рабинович Г. Д., Разделение изотопов и других смесей термодиффузией, М., 1980; 6) Андреев Б. М., Зельвенский Я. Д., Каталъников С. Г., Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами, М., 1982; 7) Ehrfeld W., Elements of flow and diffusion processes in separation nozzles, В.— (a. o.), 1983. А. А. Сазыкин.

### Электромагнитные методы

Собственно электромагнитный метод основан на том же принципе, что и *масс-спектрометр*. Любой масс-спектрометр является миниатюрной установкой для И. р. Для получения больших кол-в изотопов служат крупные установки (амер. термин *калютроны*), работающие по принципу масс-спектрометра Демпстера (рис. 4) [1—4]. В однородном магн. поле с напря-

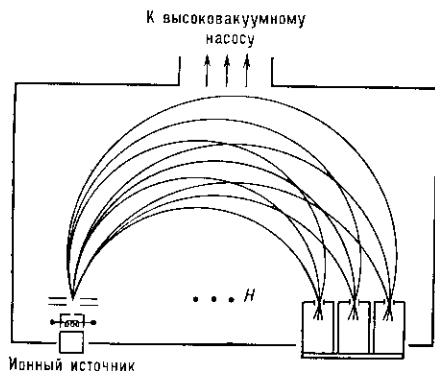


Рис. 4. Принципиальная схема электромагнитного сепаратора.

жённостью  $H$  расстояние  $d$  между фокусами соседних изотопов с массами  $M$  и  $M+\Delta M$  и зарядом  $Ze$  (дисперсия) составляет:

$$d = \rho \Delta M/M; \quad \rho = \frac{c}{H} \left( \frac{2MV}{Ze} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Здесь  $ZeV$  — энергия иона (все величины выражены в системе единиц СГСЕ), а ширина фокуса каждого изотопа (абerrация):

$$\delta = \rho \sin^2(\varphi/2) \approx \frac{1}{4} \rho \varphi^2, \quad (10)$$

где  $\varphi$  — угол раствора ионного пучка в плоскости, перпендикулярной  $H$ . И. р. возможно только при  $\delta < d$ ,

т. е. в однородном поле  $H$  — при  $\varphi < 2(\Delta M/M)^{1/2}$ . Для увеличения  $\varphi$  и обеспечения тем самым большей производительности разделит. установки применяют неоднородные (т. н. безабerrационные) магн. поля [1—3, 5], с помощью к-рых удаётся хорошо фокусировать пучки ионов с  $\varphi \approx (25-30)^\circ$  и энергией ионов 25—40 кэВ. Производительность  $Q$  разделит. установки (в идеальном случае) связана с силой тока  $I$  пучка однозарядных ионов выражением:

$$Q = 0,89 A C_0 I \text{ (г/сутки)}. \quad (11)$$

Здесь  $A$  — ат. масса разделяемого элемента,  $C_0$  — относит. концентрация выделяемого изотопа в исходной смеси ( $I$  в А). Промышл. установки позволяют накапливать до неск. десятков г изотопов в сутки. При этом коэф. обогащения в 1 цикле разделения  $\alpha = C/C_0 \sim 10-10^3$  ( $C$  — относит. концентрация изотопа в обогащённой смеси). Типичные размеры вакуумной камеры (в м):  $3 \times 1,5 \times 0,4$ .

Ток  $I$  определяется гл. обр. фокусировкой пучка, к-рая в безабerrационном магн. поле зависит от компенсации пространств. заряда пучка. Если бы расталкивание ионов пучка собств. пространств. зарядом не было скомпенсировано, то обусловленная им абerrация пучка могла бы быть меньше дисперсии лишь при очень малом  $I$ . В действительности возможна нейтрализация пространств. заряда электронами, образуемыми самим пучком в остаточном газе камеры (давление  $p=10^{-6}$  мм рт. ст.). Если бы ток  $I$  был постоянным во времени, то компенсация пространств. заряда, установившись (для этого достаточно  $\sim 10^{-4}$  с), сохранялась бы. Этому, однако, препятствуют колебат. процессы как в самом пучке, так и в ионном источнике. Вследствие этого плотность ионного тока (при определ. условиях) колеблется так быстро, что вызывает динамич. декомпенсацию пространств. заряда, резко нарушающую процесс И. р. Исследование динамич. декомпенсации [4] позволило осуществить И. р. разл. элементов при макс. токе (для элементов ср. масс — до неск. сотен мА).

В ионном источнике пары рабочего вещества ионизируются в газовом разряде, горящем в продольном магн. поле. Возникающие ионы извлекаются из разряда электрич. полем, ускоряются и поступают в разделит. камеру в виде сформированного ионного пучка. Вследствие неполной ионизации паров и наличия в пучке ионов с разл. кратностью заряда коэф. использования рабочего вещества обычно  $\sim 20-50\%$ .

В приёмнике ионов [5] пучки изотопов попадают на стенки изотопных «карманов» и оседают на них в виде нейтральных атомов. Распыление накопленного вещества и отражение ионов от стенок карманов обуславливают неполное улавливание вещества, переносимого ионным пучком. Накопленное вещество извлекается из приёмника хим. методами. Коэф. улавливания и извлечения вещества  $\approx 50-80\%$ . Т. о., коэф. использования вещества в 1 цикле И. р. от 10 до 40%.

Электромагн. методом осуществляется разделение как стабильных, так и радиоактивных изотопов. Для разделения тяжёлых элементов иногда применяются установки с меньшей производительностью, но с повышенной дисперсией, в к-рых коэф. разделения  $\alpha$  достигает 1000. В одной из таких установок [1] с поворотом пучка на  $225^\circ$  в магн. поле  $d=20$  мм на 1% относит. разности масс и  $\epsilon=1000$  для  $U$  и  $Pu$  при  $I=10$  мА. Существует двухкаскадный масс-сепаратор, в к-ром фокус пучка ионов изотопа в конце первого каскада служит источником пучка для 2-го каскада; полный угол отклонения пучка  $\sim 250^\circ$ ; для  ${}^{235}U$   $\epsilon=1400$ . Существуют калютроны с уменьшенной производительностью (на  $\sim 50\%$ ), но с увеличенной (в 1,5 раза) дисперсией, с углом поворота пучка на  $255^\circ$ . Для разделения стабильных изотопов применяются также малые установки с углом поворота пучка  $60^\circ$  и  $90^\circ$ .

В случае короткоживущих изотопов (период полураспада  $T_{1/2} \leq 20$  мс) первичные ионы, создаваемые в