

На правах рукописи

Пьи Пью АУНГ

**РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ТЕРМОДИФФУЗИИ**

05.17.01 - технология неорганических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 2011

Работа выполнена на кафедре технологии изотопов и водородной энергетики Института материалов современной энергетики и нанотехнологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Селиваненко Игорь Львович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Петропавловский Игорь Александрович
Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева

кандидат технических наук,
Сысоев Николай Яковлевич
Российский федеральный ядерный
центр - Всероссийский научно-иссле-
довательский институт эксперимен-
тальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Ведущая организация - Открытое акционерное общество
«ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара»

Защита диссертации состоится 02 марта 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.05 в Российском химико-технологическом университете (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат разослан 28 января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.204.05

М.Б. Алехина

Актуальность работы. Стабильные и радиоактивные изотопы уже более шестидесяти лет используются в различных областях науки и техники. Для большинства имеющих практическую ценность изотопов найдены эффективные способы их концентрирования. Однако в современной технике существует ряд маломасштабных, но весьма важных задач, для которых использование высокопроизводительных промышленных методов, таких как ректификация, химический изотопный обмен в колоннах, невозможно или нецелесообразно как с экономической, так и с технической точки зрения. Среди таких задач концентрирование стабильных изотопов ^{22}Ne , ^{17}O , очистка ^3He от ^4He , а также концентрирование радиоактивных изотопов ^{14}C и трития из их отходов при производстве радиофармпрепаратов.

Указанные задачи весьма эффективно могут быть решены с помощью газовой термодиффузии, достоинствами которой являются - простота, дешевизна и универсальность оборудования, весьма малая задержка по газу, быстрый выход в рабочий режим.

Настоящая работа посвящена разработке и оптимизации метода газовой термодиффузии, применительно к решению этих конкретных задач химической технологии. Этим и определяется актуальность темы.

Цели и задачи работы. Целью работы является экспериментальная и расчетная проработка возможности применения метода газовой термодиффузии для концентрирования изотопов ^{22}Ne , ^{17}O , ^3He , ^{14}C и трития.

Конкретные задачи, решаемые в работе, таковы:

1. Разработка конструкции термодиффузионной колонны и схемы установки термодиффузионного разделения с непрерывным питанием и отбором продукта и отвала;
2. Экспериментальное определение или уточнение параметров разделения, требующихся для расчета разделительных установок, таких как высота теоретической ступени разделения, циркулирующий поток по колонне, оптимальное рабочее давление;
3. Разработка методики расчета и расчет установок разделения ^{22}Ne , ^{17}O , ^3He , ^{14}C и трития применительно к существующим в промышленности задачам.
4. Создание опытно-промышленной установки разделения изотопов неона и оптимизация ее работы.

Научная новизна работы.

1. Выявлена экстремальная зависимость степени разделения изотопов в термодиффузионной колонне от давления. Экспериментально найдено оптимальное давление при разделении изотопов водорода, гелия, неона и кислорода.

2. Разработана методика определения потока газа в термодиффузионной колонне по степени ее разделения в режиме с отбором.

Практическая значимость работы.

1. Разработана универсальная конструкция термодиффузионной колонны, позволяющая поддерживать постоянное регулируемое натяжение горячего стержня с компенсацией его растяжения при нагревании.
2. Разработана простая и эффективная схема установки непрерывного действия с псевдоисчерпывающей частью, степень извлечения в которой регулируется при помощи изменения соотношения между потоком питания и отвала.
3. Разработана методика расчета и компьютерная программа для определения концентрации целевого изотопа в продукте, в зависимости от величины отбора в широком диапазоне концентраций для установки непрерывного действия.
4. Рассчитаны установки термодиффузионного разделения изотопов ^{22}Ne , ^{17}O , ^3He , ^{14}C и трития.
5. Создана опытно-промышленная разделения изотопов неона, которая в настоящее время эксплуатируется на ОАО "Раменский приборостроительный завод" производительностью 100 л/год смеси состава неон-22 (50 ± 2 ат.%) + неон-20 (50 ± 2 ат.%).

Апробация работы и публикация результатов исследования.

Основное содержание диссертации опубликовано в 2 статьях. По материалам работы сделаны доклады на XIII Международной научной конференции "Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул" (г. Звенигород (Ершово), Московская обл., 5–9 октября 2009 года) и VI Международном конгрессе молодых ученых по химии и химической технологии "МКХТ-2010" (г. Москва, 9 - 14 ноября 2010 года).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 32 таблицы с экспериментальными и расчетными данными. Список литературы включает 74 наименования.

В литературном обзоре (глава 1) рассмотрены теоретические основы термодиффузии, расчетные и экспериментальные способы определения параметров, необходимых для расчета и оптимизации разделительных колонн, конструкции термодиффузионных колонн.

Обобщены методы определения коэффициента разделения, показана связь его с молекулярной массой разделяемых газов. Коэффициент разделения α определяется разностью температур ΔT между горячей T_2 и холодной T_1 стенками колонны ($\Delta T = T_2 - T_1$) и термодиффузионной постоянной γ , которая может быть с некоторым приближением предсказана теоретически и зависит от молекулярных масс M_1 и M_2 разделяемых веществ, а также от поправочного коэффициента R_T , учитывающего характер межмолекулярных сил:

$$\alpha = 1 + \gamma \frac{\Delta T}{2\bar{T}}, \quad (1) \quad \text{где } \bar{T} = (T_2 + T_1)/2 \text{ - средняя температура}$$

$$\gamma = \frac{105}{118} * \frac{M_2 - M_1}{M_2 + M_1} R_T \quad (2)$$

Расчетные и экспериментальные значения R_T приведены в монографии [1] и позволяют рассчитать коэффициенты разделения изотопов водорода, гелия, неона, кислорода и углерода, см. табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты разделения изотопов легких элементов
методом термодиффузии

| № задачи | Разделяемая смесь изотопов | α при $T_2=773$ К и $T_1=278$ К | α при $T_2=973$ К и $T_1=278$ К |
|----------|---|--|--|
| 1 | $^{20}\text{Ne} - ^{22}\text{Ne}$ | 1,012 | 1,014 |
| 2 | $^3\text{He} - ^4\text{He}$ | 1,007 - 1,036 | 1,008 - 1,042 |
| 3 | $\text{H}_2 - \text{D}_2$ | 1,08 | 1,1 |
| 3 | $\text{H}_2 - \text{T}_2$ | 1,12 | 1,15 |
| 4 | $^{12}\text{CH}_4 - ^{14}\text{CH}_4$ | 1,007 - 1,010 | 1,008 - 1,012 |
| 5 | $^{16}\text{O}_2 - ^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ | 1,005 - 1,007 | 1,006-1,008 |
| 5 | $^{16}\text{O}_2 - ^{16}\text{O}^{17}\text{O}$ | 1,0007 - 1,004 | 1,0008 - 1,005 |
| 5 | $\text{H}_2^{16}\text{O} - \text{H}_2^{18}\text{O}$ | 1,002 - 1,01 | 1,003 - 1,016 |
| 5 | $\text{H}_2^{16}\text{O} - \text{H}_2^{17}\text{O}$ | 1,001 - 1,007 | 1,0015 - 1,008 |

Значительный разброс в величине коэффициента разделения α для некоторых изотопных смесей обусловлен весьма приближенным расчетом поправочного коэффициента R_T , для которого в [1] указан только возможный диапазон изменений.

В отличие от ректификационных и химобменных колонн, потоки фаз в термодиффузионной колонне не могут быть заданы произвольно, а определяются из условий термодинамики.

Приближенно поток можно рассчитать по соотношению:

$L = \bar{v}S$, (3) где \bar{v} - средняя линейная скорость газа,
 S - площадь сечения колонны.

Средняя скорость рассчитывается по выражению:

$$\bar{v} = \frac{\rho g \delta^2}{48\eta} \cdot \frac{\Delta T}{T}, \quad (4) \quad \text{где } \rho - \text{плотность газа, } \eta - \text{вязкость, } \delta - 1/2$$

зазора между горячей и холодной стенками.

Расчет по этим соотношениям затруднен и приводит к значительной неопределенности ввиду того, что в узком зазоре между горячей и холодной стенками имеется высокий градиент температуры и характеристики газа принимаются при усредненной температуре.

Высота теоретической ступени разделения (ВЭТС) h в термодиффузионной колонне составляет:

$$\frac{h}{\delta} = \frac{Pe}{2} + \frac{4}{Pe}, \quad (5) \quad \text{где } Pe = \frac{2\bar{v}\delta}{D} - \text{диффузионный критерий Пекле.}$$

Минимальное значение ВЭТС достигается при $Pe = 2\sqrt{2}$ и составляет:

$$h_{\min} = 2\sqrt{2} \cdot \delta \quad (6)$$

Таким образом, минимальное значение ВЭТС при термодиффузии определяется только величиной зазора между горячей и холодной стенками и не зависит от природы газа. Требуемое значение критерия Пекле достигается за счет изменения рабочего давления в колонне, зависимость ВЭТС от которого носит ярко выраженный экстремальный характер. В реальной колонне на значение ВЭТС большое влияние оказывают такие параметры, как шероховатость стенок и точность поддержания зазора по высоте колонны. Поэтому точный расчет ВЭТС весьма затруднителен.

В целом из изучения литературы можно сделать вывод, что теория термодиффузии основана на ряде допущений и носит в большой степени эмпирический характер. Она устанавливает связи и закономерности изменения основных параметров разделения, требующихся для расчета колонны, от условий проведения процесса - давления, температур горячей и холодной стенок, зазора между ними и др. Однако рассчитать их значения с точностью, достаточной для инженерных расчетов не представляется возможным. Поэтому для расчета и оптимизации конкретных задач разделения требуются дополнительные экспериментальные данные.

В главе 2 диссертации рассмотрены результаты экспериментального разделения изотопов гелия, неона, кислорода и водорода на лабораторной

экспериментальной установке в безотборном режиме с целью определения оптимального давления.

Разработанная нами термодиффузионная колонна обладала следующими конструктивными особенностями:

1. В качестве горячей стенки использовали полированные стержни из нержавеющей стали и вольфрама диаметром 2-4 мм с прямым пропусканием электрического тока, в отличие от тонкой проволоки или ТЭНов, используемых большинством исследователей. По сравнению с тонкой проволокой использование стержней позволяет получить большой восходящий тепловой поток, т.е. увеличить производительность колонны, а по сравнению с ТЭНами - получить более равномерную температуру и, таким образом, значение ВЭТС приближенное к теоретически возможному.

В качестве холодной стенки использовали полированную изнутри медную трубу, что также позволило достичь низких значений ВЭТС.

2. В качестве устройства для натяжения стержня и компенсации его удлинения при нагреве использовали сильфон, прикрепленный к одному из концов стержня. С обратной стороны сильфона создавали противодействие, позволяющее легко регулировать усилие натяжения и поддерживать его постоянным независимо от удлинения стержня.

3. Температуру горячего стержня определяли по его удлинению, причем последнее регистрировали по передвижению стального шарика на наружной поверхности колонны, приводимому в движение магнитом, прикрепленном к подвижному концу сильфона.

Высота разделительной части колонны составляла $H_k=2,03$ м, зазор между горячей и холодной стенками составлял 5 мм, температура холодной стенки $T_x=278$ К.

В качестве рабочих веществ использовали газообразные гелий, водород, неон и кислород. Изопный анализ проводили с использованием масспектрометрического метода для изотопов гелия, неона и кислорода, и спектрального - для изотопов водорода.

В опытах по разделению изотопов неона температуру горячей стенки меняли от 470 К до 1020 К и давление от 1,2 до 6,1 атм. В этой серии опытов показано, что оптимальное рабочее давление не зависит от разности температур между горячей и холодной стенками.

Результаты экспериментов по определению зависимости степени разделения от рабочего давления представлены на рис. 1.

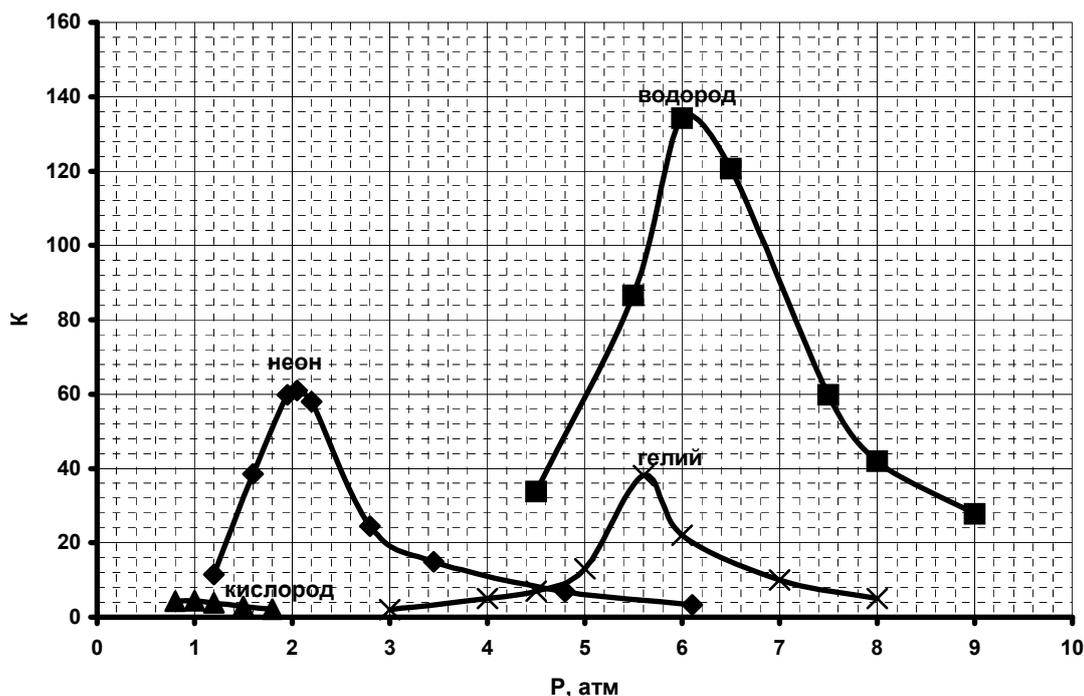


Рис. 1. Зависимость степени разделения термодиффузионной колонны в безотборном режиме при разделении изотопов водорода ($\Delta T=200$ К), гелия ($\Delta T=200$ К), неона ($\Delta T=700$ К) и кислорода ($\Delta T=700$ К)

Оптимальное давление разделения, как видно из данных рис. 1, уменьшается с увеличением молекулярной массы разделяемых газов и составляет 6 атм. для водорода, 5,6 атм. для гелия, 2 атм для неона и 1 атм для кислорода. Число теоретических ступеней разделения N при оптимальном давлении, рассчитанное по уравнению Фенске для безотборного режима $K = \alpha^N$, для всех четырех газов оказалось одинаковым и составило 400 теоретических ступеней, что соответствует ВЭТС=0,75 см. Теоретическое значение ВЭТС, рассчитанное по уравнению (6) при $\delta=2,5$ мм должно было составить 0,71 см. Таким образом, отрицательный вклад неидеальности при изготовлении колонны составил 0,04 см.

В главе 3 представлены экспериментальные данные по разделению изотопов неона, водорода, гелия и кислорода в режиме с непрерывным питанием и отбором продукта и отвала.

Для реализации такого режима была разработана схема установки, см. рис. 2, отличительной особенностью которой является возможность работы с регулируемым исчерпыванием целевого изотопа из сырьевого потока без наличия как таковой исчерпывающей части, т.е. участка колонны, расположенного выше точки ввода сырья.

Сырьевой газ, например Ne, из баллона (7) подавали в верхний накопительный объем колонны, образованный сильфоном (3), предназначенным также для компенсации удлинения стержня (2) и его натяжения. Постоянное давление в колонне поддерживали с точностью $\pm 0,05$ атм при помощи редуктора давления газа, установленного на сырьевом баллоне. Температуру определяли по удлинению стержня с точностью ± 5 К, регистрируемому по изменению положения стального шарика (5), расположенного на наружной поверхности объема (6) и перемещаемого при помощи магнита (4), соединенного с сильфоном.

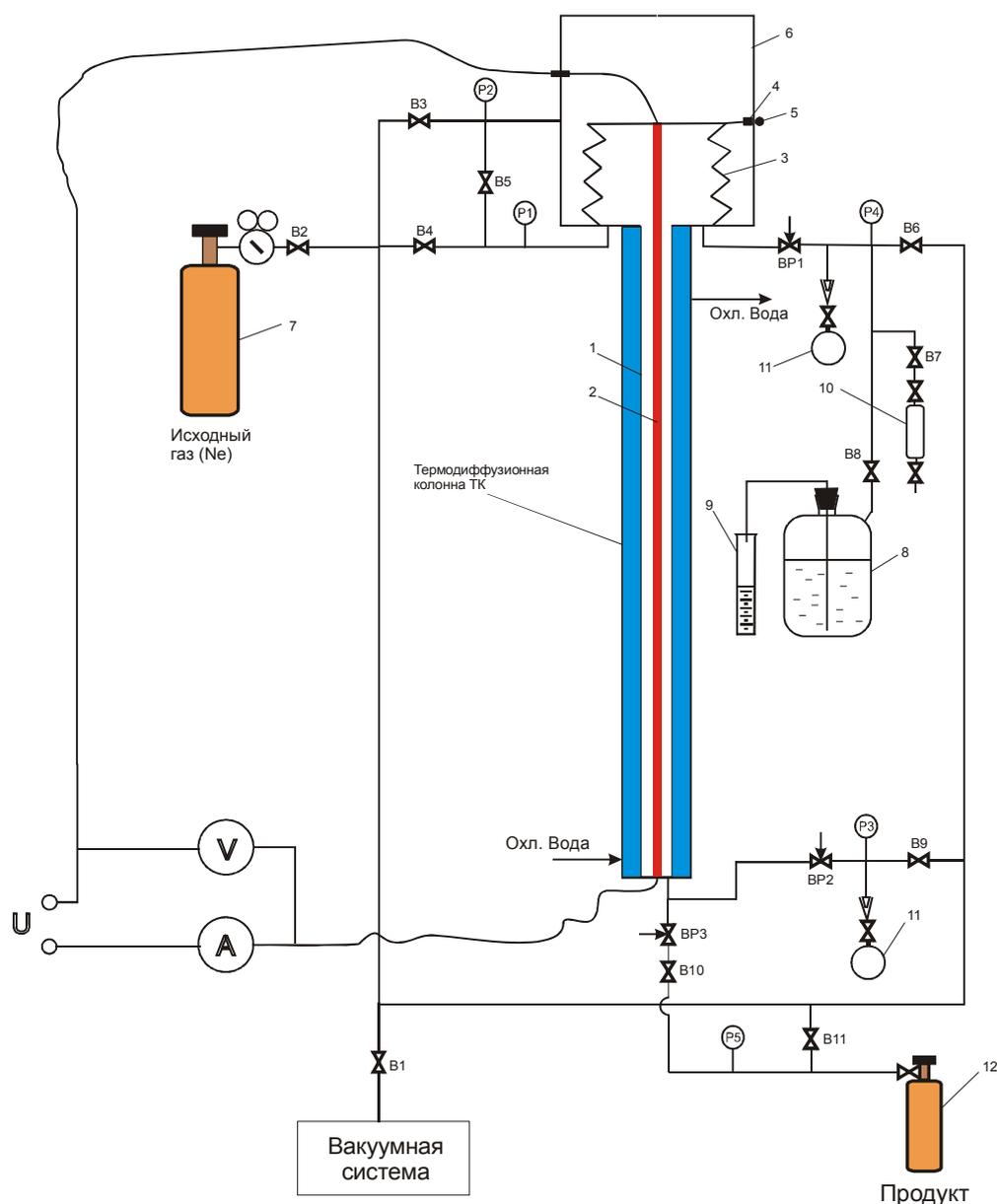


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Регулируемый отбор продукта осуществляли через вентиль тонкой регулировки (BP3) в заранее откачанный баллон (12). Регулируемый сброс обедненного отвалного потока осуществляли через вентиль тонкой регулировки (BP1).

Регулируемое исчерпывание получали путем изменения потока отвала. В верхний накопительный объем поступает сырьевой поток и отвальный поток из колонны. Благодаря наличию нагретой нити и небольшому объему там происходит полное перемешивание и усреднение концентрации. Таким образом, можно считать, что на питание колонны подается газ с усредненной концентрацией. Он же направляется в отвал.

Соответственно, при увеличении отвального потока концентрация в накопительном объеме стремится к концентрации изотопа в сырьевом баллоне. А при уменьшении потока отвала - снижается до величины, определяемой степенью разделения колонны и отбором продукта. Так в одном из опытов по разделению изотопов неона, при исходной концентрации ^{22}Ne в сырьевом баллоне составляющей 9,46 ат.%, в отвале была достигнута концентрация 2,29 ат.%. При этом в продукте концентрация ^{22}Ne составила 14,5 ат.%. В то же время при отвальной концентрации 8,98 ат.% была достигнута концентрация ^{22}Ne в продукте 70,65 ат.%.

Таким образом, разработанная схема позволяет без изменения конструкции колонны (т.е. без переноса точки питания) осуществлять как концентрирование, так и исчерпывание по целевому изотопу.

Эксперименты по разделению с отбором продукта проводили с целью определения циркулирующего потока газа по колонне, который не может быть измерен прямым экспериментальным методом.

Эксперименты по разделению с отбором продукта проводили с целью определения циркулирующего потока газа по колонне, который не может быть измерен прямым экспериментальным методом.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость степени разделения термодиффузионной колонны от отбора продукта для изотопов водорода, неона и кислорода. Ввиду высокой стоимости изотопа ^3He и его ограниченной доступности эксперименты с отбором по разделению изотопов гелия не проводили.

Из данных рис. 3 видно, что степень разделения термодиффузионной колонны K в безотборном режиме растет с уменьшением молекулярной массы разделяемого газа, что связано с ростом коэффициента разделения α , и падает с увеличением отбора продукта.

В главе 4 разработана методика расчета термодиффузионной колонны, работающей в режиме концентрирования по описанной в главе 3 схеме и методика определения циркулирующего потока газа на основании экспериментальных данных по зависимости степени разделения колонны от отбора.

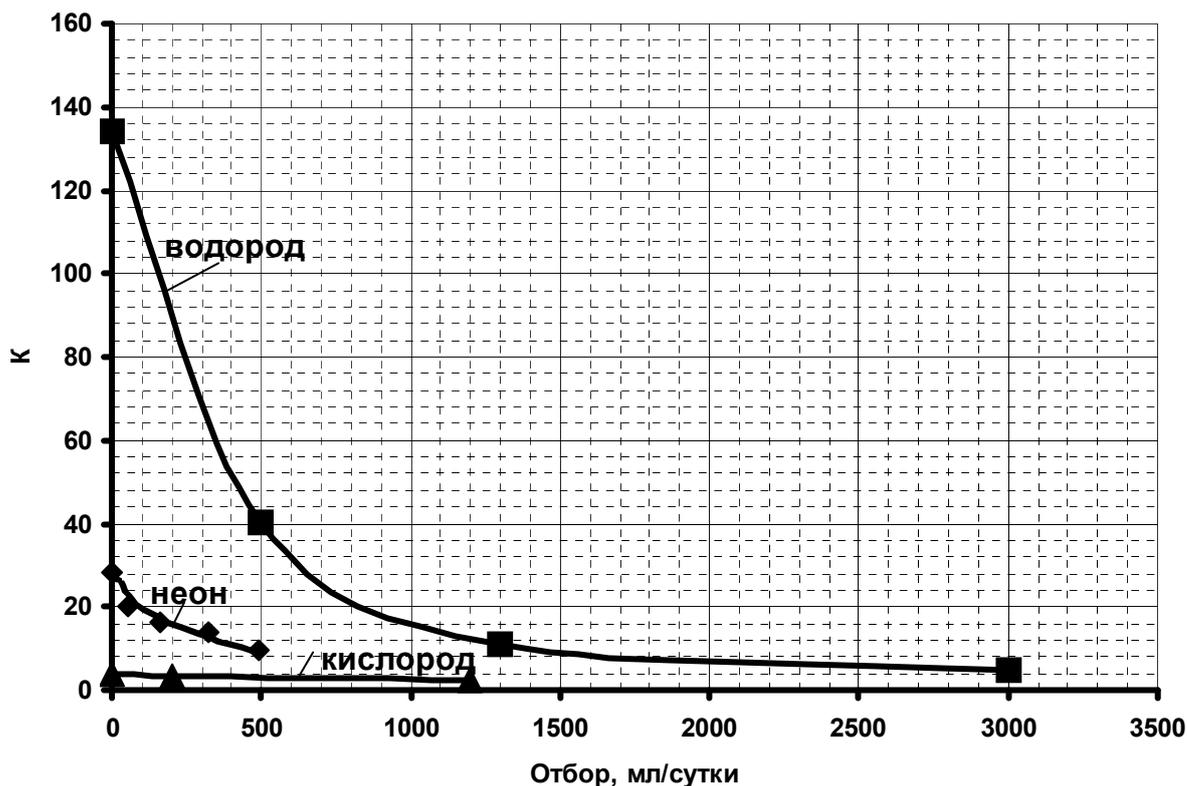


Рис. 3. Зависимость степени разделения K термодиффузионной колонны от величины отбора продукта (мл/сут) при разделении изотопов водорода, кислорода и неона

На рис. 4 изображена X-Y диаграмма концентрирующей колонны.

Уравнение равновесия в широком интервале концентраций можно записать как:

$$X = 100\alpha Y / (100 + \alpha Y - Y), \quad (7)$$

где X (ат.%) - концентрация тяжелого изотопа в нисходящем холодном потоке, Y (ат.%) - концентрация тяжелого изотопа в восходящем горячем потоке.

Уравнение рабочей линии:

$$X = KY + B, \quad (8)$$

где K и B зависят от заданных концентраций на верхнем и нижнем концах колонны.

Уравнение диагонали:

$$X = Y \quad (9)$$

Из экспериментов в безотборном режиме известна максимальная достигаемая степень разделения K_6 . Значит, зная α , по уравнению Фенске для безотборного режима:

$$N_s = \frac{\ln K_6}{\ln \alpha}, \quad (10)$$

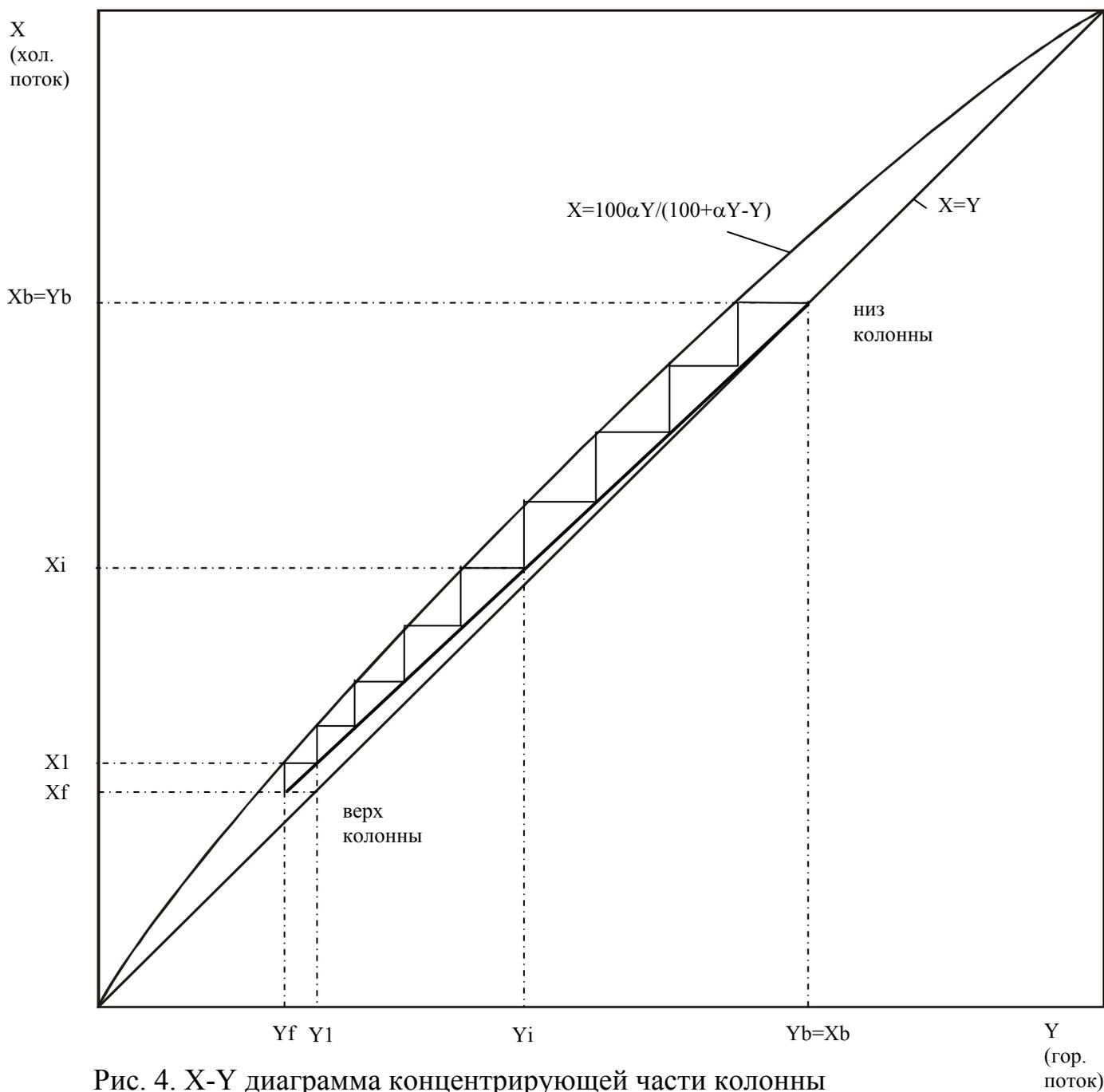


Рис. 4. X-Y диаграмма концентрирующей части колонны

можно определить N_s - количество теоретических ступеней **ЧТСР** для экспериментальной колонны.

Из экспериментов с отбором продукта известна исходная концентрация целевого изотопа в сырье, концентрация его в продукте в зависимости от отбора и отвальная концентрация. Для расчета числа теоретических ступеней разделения в колонне N была написана компьютерная программа на языке BASIC. При известной концентрации тяжелого изотопа, поступающего в верхнюю часть колонны с холодным газом, целью расчета является поиск такой концентрации его в потоке горячего газа, выходящего из колонны, при которой

расчетное количество ступеней разделения окажется равным экспериментально определенному N , из экспериментов в безотборном режиме.

Далее по уравнению материального баланса для концентрирующей части колонны можно определить циркулирующий по колонне поток.

Пусть L - поток разделяемого газа по колонне (л/час), тогда, см. рис. 5:

$$L X_f = B Y_b + (L-B) Y_f$$

Отсюда:

$$B = L (X_f - Y_f) / (Y_b - Y_f),$$

Соответственно $L = B(Y_b - Y_f) / (X_f - Y_f)$ (11)

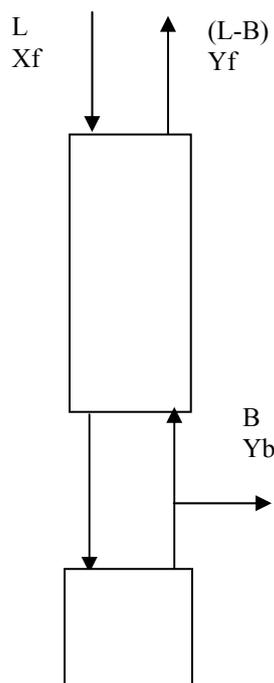


Рис. 5. Схема материальных потоков по колонне

Очевидно, что значения потока L должны получиться одинаковыми при различных отборах. Взяв среднее арифметическое между рассчитанными таким образом значениями потока можно определить истинную величину L , которую можно впоследствии использовать для расчета промышленных установок.

В табл. 3 представлены результаты расчета циркулирующего по термодиффузионной колонне потока, проведенного на основании экспериментальных данных по степени разделения в режиме работы с отбором, см. рис. 3.

Из данных табл. 2 видно, что величина циркулирующего потока, приведенная к давлению 1 атм для всех трех газов близка и в пределах точности ее определения составляет около 10 л/час.

Таблица 2

Результаты расчета потока в термодиффузионной колонне по степени разделения при работе ее с отбором

| Разделяемый газ | Отбор, мл/сут | K | Поток L, л/час (в пересчете на P=1 атм) | \bar{L} , л/час |
|-----------------|---------------|-------|---|----------------------|
| водород | 0 | 134 | | 10,3 |
| | 500 | 40,34 | 10,2 | |
| | 1300 | 10,96 | 10,0 | |
| | 3000 | 4,7 | 10,6 | |
| кислород | 0 | 4,4 | | 12,8 |
| | 200 | 3,42 | 12,3 | |
| | 1200 | 2,17 | 13,4 | |
| неон | 0 | 28,3 | | 9,4 |
| | 57 | 20 | 9,4 | |
| | 163 | 16,5 | 9,9 | |
| | 320 | 13,8 | 9,0 | |
| | 490 | 9,5 | 9,3 | |

В главе 5 проведен расчет установок термодиффузионного разделения применительно к сформулированным во введении задачам.

При выборе исходных данных для расчета учитывали следующие обстоятельства. С одной стороны, изменение диаметра термодиффузионной колонны приводит к изменению зазора между горячей и холодной стенками и, соответственно, к изменению ВЭТС и потока по колонне, а с другой стороны, величина зазора ограничена 7 мм. При увеличении высоты колонны существенно возрастают трудности, связанные с центровкой горячей и холодной стенок относительно друг друга. Поэтому при выборе диаметра колонны приняли те характеристики, которые имела экспериментальная колонна, поскольку для этого случая имеются прямые экспериментальные данные, т.е. внутренний диаметр 13 мм, толщина горячего стержня 3 мм (зазор составляет 5 мм). Выбор высоты ограничили 3 м. Результаты расчета колонн представлены в табл. 4.

Из данных расчета видно, что первые три задачи могут эффективно быть решены при помощи термодиффузии. Концентрирование ^{14}C из отходов радиофармпрепаратов ввиду требуемой весьма высокой концентрации его в продукте при достаточно низкой концентрации в сырье методом термодиффузии затруднительно. Однако, может быть реализована каскадная схема, при которой на первой ступени имеются две колонны, из которых

Таблица 4

Результаты расчета производительности термодиффузионных колонн

| Задача разделения | X_f , ат. % | X_p , ат. % | X_b , ат. % | Н, м | В | Г, % |
|---|---------------|---------------|---------------|----------------------------------|---------------|------|
| Концентрирование ^{22}Ne | 8,82 | 8 | 50 | 3 | 130 л/год | 11 |
| Очистка ^3He | 99 | 94 | 99,5 | 3 | 2065 л/год | 91 |
| | 99 | 94 | 99,9 | 3 | 194 л/год | 85,5 |
| Концентрирование трития из отходов | 50 | 5 | 98 | 2 | 990 л/год | 94,8 |
| Задача разделения | X_f , ат. % | X_p , ат. % | X_b , ат. % | Н, м | В | Г, % |
| Концентрирование ^{14}C из отходов радиофармпрепаратов (рабочий газ - метан) | 0,5 | 0,25 | 5 | 3 кол. по 3 м в каскаде | 28 г/год | 57 |
| Концентрирование ^{17}O (рабочий газ - водяной пар) | 10 | 5 | 40 | 3 кол. по 3 м в каскаде | 50 г/год | 50 |

X_f - концентрация целевого изотопа в сырье; X_p - концентрация целевого изотопа в отвальном потоке; X_b - концентрация целевого изотопа в продукте; Н - высота колонны (принято значение ВЭТС = 1 см); В - производительность установки; Г - степень извлечения целевого изотопа из сырьевого потока

обогащенный газ подается в одну колонну второй ступени, в которой происходит концентрирование ^{14}C до 5 ат. % и исчерпывание до сырьевой концентрации 0,5 ат. %. Далее ^{14}C с концентрацией 5 ат. % может быть доведен до продукта при помощи газоцентрифужного метода. Концентрирование ^{17}O до 40 ат. % также может быть реализовано в каскаде термодиффузионных колонн с двумя колоннами на первой ступени и с одной

колонной на 2-й ступени. Производительность такого каскада составит 50 г в год. При этом задержка вещества в установке составит всего 6 г воды. Для увеличения производительности производства ^{17}O целесообразно использовать несколько параллельно работающих независимых установок.

Для решения задачи концентрирования изотопа ^{22}Ne по результатам расчетов создана опытно-промышленная установка, на которой была наработана опытная партия ^{22}Ne . Полученный газ по изотопной и химической чистоте полностью соответствовал требованиям Заказчика - ОАО "Раменский приборостроительный завод". В настоящее время эта установка эксплуатируется на территории Заказчика. На ней проведена оптимизация рабочего режима, позволившая повысить производительность установки на 6 % и уменьшить энергетические затраты на 5,6 %.

Выводы.

1. Разработана конструкция термодиффузионной колонны и схема установки с непрерывным питанием и отбором продукта и отвала, отличительными особенностями которых являются:
 - наличие сильфона, обеспечивающего постоянное натяжение стержня горячей стенки и компенсацию его удлинения.
 - обеспечение в одной колонне как концентрирования, так и регулируемого извлечения целевого изотопа без изменения местоположения точки питания.
2. Выявлена экстремальная зависимость степени разделения изотопов в термодиффузионной колонне от давления. Установлено, что оптимальное рабочее давление, обеспечивающее максимальную степень разделения колонны в безотборном режиме составляет 6 атм для водорода, 5,6 атм для гелия, 2 атм для неона и 1 атм для кислорода.
3. Разработан способ определения потока газа в термодиффузионной колонне по экспериментальной зависимости степени разделения колонны от отбора продукта. Показано, что при диаметре колонны 13 мм и разности температур 200 – 700 К для исследованных газов поток по колонне составляет 9 – 13 л/час (в пересчете на нормальные условия).

4. Показано, что высота теоретической ступени разделения в разработанной термодиффузионной колонне при оптимальном давлении составляет 0,75 см, что практически совпадает с расчетной величиной (0,72 мм) для идеальной геометрии термодиффузионной колонны.

5. На основании полученных в работе данных рассчитаны термодиффузионные разделительные установки для решения ряда промышленных задач концентрирования изотопов ^{22}Ne , ^{17}O , ^3He , ^{14}C и трития.

6. Создана и внедрена на предприятии ОАО «Раменский приборостроительный завод» установка термодиффузионного разделения изотопов неона с колонной высотой 3 м диаметром 13 мм, производительностью до 130 л/год по ^{22}Ne с концентрацией 50 ат.%. Проведена оптимизация рабочего режима установки и наработка опытного образца 8 л газа, который по изотопному и химическому составу полностью соответствует требованиям Заказчика.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Пьи Пью Аунг, И.Л. Селиваненко. Получение изотопов неона, водорода и кислорода методом газовой термодиффузии // Перспективные материалы.-спец. Выпуск (8).-февраль 2010.-с.225-229.
2. Пьи Пью Аунг, И.Л. Селиваненко. Эффективность разделения изотопов методом газовой термодиффузии // Успехи в химии и химической технологии: сб. научных трудов.-т. XXIV, № 8.-М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010.-с.35-39.

Заказ № _____ Объем _____ п.л. Тираж 100 экз.
Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева