**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**

**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа ядерных технологий

Направление – Ядерные физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

Отчет по лабораторной работе №7

по дисциплине

«Методы разделения стабильных изотопов»

**Расчет характеристик термодиффузионного разделения**

Вариант 6

Исполнитель:

Студент, гр. 0А8Д \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Кузьменко А.С.

подпись дата

Проверил:

Профессор ОЯТЦ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Орлов А.А.

подпись дата

Томск – 2021

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ЦЕЛЬ РАБОТЫ 3](#_Toc89111055)

[1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ 3](#_Toc89111056)

[Введение 3](#_Toc89111057)

[1.1. Строгая кинетическая теория 5](#_Toc89111058)

[1.2. Классическая молекулярно-кинетическая теория газов 6](#_Toc89111059)

[1.3. Термодинамика необратимых процессов 6](#_Toc89111060)

[1.4. Методика выполнения расчета 7](#_Toc89111061)

[2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ 14](#_Toc89111062)

[3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ 14](#_Toc89111063)

[ВЫВОДЫ 16](#_Toc89111064)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

С использованием элементарной теории Джонса и Ферри произвести расчет скорости конвекции потока в термодиффузионной установки, коэффициента разделения установки, а также определить значение расстояния между стенками колонны, соответствующее максимальному коэффициенту разделения при известном температурном режиме ее работы.

**1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

**Введение**

Разделение смесей – существенный этап многих процессов химической технологии, осуществляемый различными методами, целесообразность применения каждого из которых при решении конкретной разделительной задачи определяется технико-экономическими расчетами. Одним из таких методов является термодиффузия, нашедшая применение в технологии обогащения изотопов и других процессах тонкого разделения.

Сущность явлений термодиффузии состоит в том, что наложение градиента температур на первоначально однородную смесь газов приводит к нарушению однородности ее состава, т.е. к частичному разделению смесей на компоненты. При этом газовая среда с более высокой температурой, как правило, обогащается легким компонентом, а в области с более низкой температурой – более тяжелым.

Термодиффузия является одним из первых методов разделения изотопов. Основное развитие метод получил в 40-50 годы. В последующем для основных коммерческих изотопов были реализованы более эффективные и производительные процессы. Однако в настоящее время возник ряд важных задач, для решения которых использование термодиффузии может быть экономически оправдано. Рассмотрим основные направления практического применения метода термодиффузии для решения современных задач, связанных с разделением изотопов:

1. Задача концентрирование радиоактивных изотопов водорода – трития из его высокообогащенных отходов стоит на предприятиях, производящих меченные тритием соединения медицинского назначения, а также в организациях, изучающих поведение трития в конструкционных материалах для атомной промышленности.

2. Очистка изотопа 3He от 4He. 3He является редким изотопом и образуется при радиоактивном распаде трития и используется в медицине и ядерной технике. Создание установки ректификации гелия, работающей на уровне температур жидкого гелия нецелесообразно.

3. Изотоп 14C также используется для синтеза медицинских радиофармпрепаратов. Изотопное концентрирование 14C осуществляется центрифугированием углекислого газа, полученного термическим разложением карбоната бария. Однако, при такой схеме переработки возникает ряд технологических и организационных сложностей: низкая эффективность центрифужного метода при низкой концентрации 14C в сырье, что приводит к увеличению количества центрифуг в каскаде и высокой задержке вещества в каскаде; необходимость перевозки радиоактивного материала. Поэтому представляет интерес промышленная реализация термодиффузионных колонн для концентрирования 14C.

4. Изотоп 17O представляет большой интерес для медицины, поскольку используется при томографии и, как ожидается, может существенно повысить точность диагностики онкологических заболеваний. Но в связи с низкой природной концентрацией (0.038%)и требуемой концентрацией не ниже 40%, ректификационные методы не эффективны, поскольку стоимость сырья только для заполнения куба ректификационной колонны и формирования задержки на насадке для обогащения лишь до 10% уже становится колоссальной.

5. Концентрирование изотопа 22Ne, использующегося при создании лазеров для гироскопов в авиационной промышленности. Потребность в целевой изотопной смеси 22Ne + 20Ne составляет для России несколько десятков литров в год. Создание сложной и дорогостоящей установки низкотемпературной ректификации неона для решения этой задачи неприемлемо.

Таким образом, видно, что процесс термодиффузионного разделения смесей веществ не утратил свою актуальность и продолжает использоваться в настоящее время. Основной интерес представляет использования термодиффузии для разделения изотопов тех элементов, которые имеют газообразные соединения только при сравнительно высокой температуре, при которой не могут быть применены универсальные газовые центрифуги, либо не могут быть разделены ректификационными методами, в связи с низкой температурой кипения.

Основными достоинствами термодиффузионного метода разделения является простота и низка стоимость оборудования, высокая эффективность (малое значение высоты теоретической ступени разделения) и малая задержка вещества в разделительных установках.

Для расчета термодиффузионных разделительных колонн, как и любых других колонн для разделения изотопов, необходимо знать коэффициент разделения, высоту теоретической ступени разделения, поток вещества по колонне, а также зависимость этих величин от рабочих условий процесса. Процесс термической диффузии в газовой среде можно описать с помощью различных теорий: классической молекулярно-кинетической, строгой молекулярно-кинетической, термодинамики необратимых процессов и др.

**1.1. Строгая кинетическая теория**

Строгая кинетическая теория объясняет макроскопически наблюдаемые явления в газовой системе, которая находится в состоянии, близком к тепловому равновесию, на основе свойств отдельных молекул. В рамках этой теории определены уравнения переноса плотности и концентрации компонентов газовой смеси, их средняя скорость и температура, а также выражения для определения диффузионных потоков частиц, тензора давлений и вектора теплового потока. Кроме того, строгая кинетическая теория позволила получить явные выражения для расчета свойств переноса индивидуальных газов и газовых смесей с помощью известных моделей взаимодействия молекул.

Допущения, ограничивающие область применения формул строгой кинетической теории для коэффициентов переноса следующие: учитываются только двойные столкновения между молекулами; динамика столкновения молекул рассчитывается с помощью классической механики без учета квантовой механики, появляющейся при низких температурах; поверхностные эффекты малы, газ рассматривается как сплошная среда; рассматриваются молекулы одноатомного газа, не имеющие внутренних степеней свободы; рассматриваются только упругие взаимодействия.

**1.2. Классическая молекулярно-кинетическая теория газов**

В классической молекулярно-кинетической теории газов делаются следующие допущения: процесс переноса в газовой фазе рассматривается как перенос массы, импульса и энергии частицами в локально-равновесной системе; молекулы считаются твердыми сферами с постоянным диаметром и не притягиваются друг к другу; распределение молекул одного вещества по скоростям в любой точке предполагается максвелловским, а скорости движения молекул другого вещества одинаковы и равны значению средней арифметической или средней квадратичной скорости; в каждом направлении, параллельном координатным осям движется 1/6 часть всех молекул.

В классической молекулярно-кинетической теории газов коэффициенты взаимной диффузии бинарной смеси определяются величинами средних длин свободного пробега компонентов.

**1.3. Термодинамика необратимых процессов**

В основе термодинамического описания явлений переноса на основании положение термодинамики необратимых процессов лежат два основных закона: закон сохранения массы и закон сохранения и превращения энергии, а также принцип возрастания энтропии. Термодинамика необратимых процессов позволяет получить связь между коэффициентами переноса и термодинамическими функциями на основании рассмотрения баланса энтропии.

Термодиффузионная колонна может представлять собой либо два коаксиальных цилиндра, внутренний нагревается, внешний охлаждается – концентрическая колонна, либо охлаждаемый цилиндр, по оси которого натянута нагреваемая проволока – проволочная колонна. Проволочная колонна позволяет использовать большие градиенты температур и более энергоэффективна, чем концентрическая. Принцип работы колонн основан на сочетании термодиффузии в горизонтальном направлении и перпендикулярной к ней тепловой конвекции.

**1.4. Методика выполнения расчета**

Математическая теория термодиффузионного разделения достаточно сложна, поэтому будем рассматривать элементарную теорию Джонса и Ферри, которая выявляет физические процессы в колонне более ясно. При рассмотрении данного процесса ими были сделаны следующие упрощающие предположения:

- Различие масс молекул двух компонентов так мало, что можно пренебречь изменением плотности с изменением состава смеси.

- Можно пренебречь зависимостью вязкости, теплопроводности и диффузии от температуры. Зависимостью плотности от температуры также можно пренебречь во всех случаях, за исключением вывода скорости конвекции.

- Газовая смесь находится между плоскими стенками и движется в колонне двумя потоками – вверх и вниз, причем скорость по поперечному сечению каждого потока постоянна.

- Поток является ламинарным.

- Распределение температур определяется только одной теплопроводностью.

Направление нормали к стенке принимается за ось ; при этом расстояние между стенками , область изменения  заключена между  и . Ширина стенок в направлении  равняется  и высота в направлении  равна . Температура стенок –  и ; , .

*Определение скорости конвекции.* Уравнение для установившегося течения элемента газа, заключенного между стенками имеет вид:

,

где  – вязкость,  – скорость в направлении ,  – плотность и  – давление. Здесь градиент давления  равен , где  –средняя плотность в поперечном сечении, . Тогда:

,

где ᶃ – ускорение свободного падения (9,8 м/с2).

Плотность  может быть выражена приблизительно, как линейная функция средней плотности , т.е.

.

Согласно предположению об отсутствии зависимости теплопроводности от температуры, получаем, что температурный градиент однороден и равен:

.

Таким образом, имеем:

.

Пренебрегая различием между  и , можно записать:

.

Интегрирование уравнения при условии  для  дает:

 (1)

Уравнение (1) необходимо продифференцировать, чтобы определить 2 точки экстремума. Для этого дифференциальное уравнение необходимо приравнять нулю. Получится 2 корня, один из которых отрицательный. Его нельзя использовать. Второй корень – это значение х, при котором скорость максимальна. Его подставляют в уравнение (1) и находят максимальную скорость.

Таким образом, скорость по сечению меняется, как показано на рисунке 1. Средняя скорость в интервале от  до  равна

 (2)

и должна быть приписана каждому из двух потоков, так как скорость считается постоянной в поперечном сечении каждого потока.

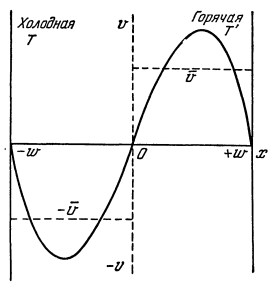


Рисунок 1 – Изменение скорости конвекции с расстоянием от стенок (плоскость проходит посередине между стенками)

*Определение переноса.* Поток молекул любого вида вверх по колонне определяется двумя факторами: конвективным потоком и процессом концентрационной диффузии, который начинается, как только устанавливается продольный градиент концентрации. Благодаря термической диффузии концентрация более тяжелых молекул 1 в движущемся вверх потоке меньше, чем концентрация в потоке, движущемся вниз. Пусть объемная концентрация молекул движущегося вверх потока, усредненная по поперечному сечению, будет  и в движущемся вниз потоке . Тогда перенос молекул 1 вниз по колонне со средней скоростью вследствие конвективных токов будет равен

,

а вследствие концентрационной диффузии

,

где  и  – соответственно средние значения объемной концентрации обоих видов молекул и относительной концентрации молекул 1.

Полный перенос вниз по колонне равен

,

или

,

при условии, что  не меняется с температурой. Масса перенесенных молекул равна

.

Допускаем, что скорость изменения концентрации во времени в любой точке мала, так что условия считаются установившимися. Это выполняется, если в каждом конце колонны имеется резервуар, достаточно большой по сравнению с объемом самой колонны. В этом квазиустановившемся состоянии факторы, вызывающие изменение , должны иметь равнодействующую, равную нулю. Такими факторами являются конвекция и диффузия. При этом конвекция должна понижать разность концентраций  существующую в колонне для любого значения . Скорость уменьшения  за счет конвекции равна . Термическая диффузия в поперечном направлении вызывает увеличение разности концентраций. Число молекул 1 в единице объема потока вследствие термической диффузии составляет

.

Так как этот поток проходит в слой газа толщиной ,  при скорости  увеличивается, а  уменьшается. Следовательно,  увеличивается при . Поэтому в квазиустановившемся состоянии

.

Если в выражении для  напишем:

,  и ,

то получим:

.

Подставив это значение в выражение для потока массы, имеем:



где



Эти три множителя соответствуют вкладу термической диффузии, конвекции и продольной диффузии. Более точная теория, в которой принимаются во внимание зависимость плотности, теплопроводности и т.д. от температуры и изменение скорости конвекции в поперечном сечении, приводит к аналогичному выражению для переноса, но другим численным множителям при  и . К сумме  следует также прибавить выражение , которое учитывает перемешивающее влияние небольших нарушений температурного распределения в колонне. Это выражение не может быть оценено теоретически, но может быть найдено экспериментально.

*Установившееся состояние*. При продолжении процессов конвекции и диффузии в конечном счете достигается установившееся состояние, для которого перенос равен нулю. Тогда

, где ,

откуда

,

или

,

где индексы  и  относятся к верхнему и нижнему концам колонны, а  – высота колонны. Следовательно,

 (3)

где  – коэффициент разделения, а . Поэтому для получения большего разделения высота колонны и отношение эффекта термической диффузии  к эффекту перемешивания, определяемому , должны быть большими. Можно легко показать, что величина  в функции расстояния между стенками  имеет максимальное, когда , т.е. когда

 (4)

Это максимальное значение  равно



(точная теория дает множитель ). Исходя из этого, может быть подсчитано расстояние, которое соответствует максимальному коэффициенту разделения для данных температур  и .

**2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Таблица 1 – Исходные данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Разделяемая смесь изотопов | , К | , К | ,  г/см3 | , Па·с | , м | L, м |  |
| 16O2 – 16O18O | 973 | 273 | 1430 | 4779 | 0,01 | 0,4 | 0,019 |

**3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Для определения максимальной скорости потока в положительном направлении z продифференцировано уравнение (1) по x:



 (5)

Определены разность температур стенок (6) и средняя температура (7):

 (6)



 (7)



Полученное выражение приравнено к нулю и определены точки x, соответствующие экстремумам функции u(x):















Максимальная скорость потока равна:



 (8)



По формуле (2) вычислена средняя скорость потока в интервале от   
*x* = 0 до *L*:



Определен коэффициент разделения колонны по формуле (3) и коэффициенты для расчета по формулам (9)-(13):





 (9)



 (10)



 (11)



 (12)



 (13)





Рассчитано значение расстояния между стенками колонны *w* соответствующее максимальному коэффициенту разделения колонны при данном температурном режиме ее работы по формуле (4):



**ВЫВОДЫ**

С использованием элементарной теории Джонса и Ферри проведен расчет скорости конвекции потока в термодиффузионной установке, коэффициента разделения установки, а также определено значение расстояния между стенками колонны, соответствующее максимальному коэффициенту разделения при известном температурном режиме ее работы.

В результате расчета максимальный коэффициент разделения колонны для смеси изотопов 16O2 – 16O18O при температурном режиме *T*1 = 973 К,   
*T*2 = 273 К достигается при расстоянии между стенками колонны *w* равным .