|  |  |
| --- | --- |
| Курс: | Основы радиохимии |
| Модуль 1: | Радиоактивность |

|  |  |
| --- | --- |
| Автор | Макасеев Юрий Николаевич, к.х.н. |
|  |  |
| Рецензенты |  |
|  |  |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Длительность  (рекомендуемая) | 2 часа |
|  |  |
| Главная цель | По окончании изучения темы обучаемый будет иметь общие сведения об основных понятиях и определениях радиохимии. |
|  |  |
| Промежуточные цели | * Иметь общие сведения о природных и искусственных радиоактивных элементах. * Объяснить, как происходит радиоактивный распад и спонтанное деление ядер * Знать законы радиоактивного распада и радиоактивного равновесия * Назвать основные переделы ядерного топливного цикла |

1.1. **Природные и искусственные радиоактивные элементы.**

***Радиоактивный элемент*** – это химический элемент, все изотопы которого радиоактивны.

***Радиоактивный изотоп*** – вид радиоактивных атомов имеющих одинаковое массовое число, но различные периоды полураспада, тип распада и энергию излучения.

Радиоактивные элементы подразделяются на ***природные и искусственные***. Естественные радиоактивные элементы в природе образуются в результате распада изотопов U235, U238 и Th232. К ним относятся такие элементы как Po, Rn, Fr, Ac, Th, U, Pa и At. К искусственным радиоактивным изотопам относятся Tc, Pm и все элементы с порядковым номером 93 и выше.

Кроме изотопов U и Th в природе найдены и другие изотопы, приведенные в таблице 1.1. Это К-40, Ca-48, Rb-87, In-115, Ce-142, Nd-144.

Таблица 1.1. Природные изотопы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Изотоп | Среднее содержание, % | Период полураспада Т1/2, ч | Тип распада |
|  | 0,0119 | 1,3∙109 | β- |
|  | 0,179 | 2∙1016 | β- |
|  | 27,85 | 6,16∙1010 | β- |
|  | 95,77 | 6∙1014 | β- |
|  | 11,70 | 5,1∙1015 | α |
|  | 23,87 | 5∙1015 | β- |

1.2. **Ядерные реакции (радиоактивный распад и спонтанное деление ядер).**

**Чем характеризуется процесс радиоактивного распада?**

Процесс радиоактивного распада сопровождается α, β, γ излучением и образованием нового ядра с изменением заряда ядра и его массового числа. Так, например, изотоп урана с массовым числом 238 и зарядом ядра 92 при радиоактивном распаде испускает альфа частицу с массовым числом 4 и зарядом 2. При этом массовое число нового ядра 234, а его заряд 90, что соответствует изотопу тория. Изотоп тория 234 распадается с испусканием бета частицы с зарядом минус единица и образуется новое ядро с зарядом 91 и массовым числом 234. Это изотоп протактиния.

***Критерием нестабильности ядра является соотношение нейтронов и протонов в ядре.*** Если соотношение нейтронов и протонов больше 1,5, то ядро нестабильно и радиоактивно. Например, ядро изотопа урана 238 содержит 146 нейтронов, 92 протона. Соотношение нейтронов и протонов в ядре 1,59 и оно радиоактивно.

Радиоактивные изотопы U235, U238 и Th232 в результате распада образуют ряды из продуктов распада. Эти ряды называют радиоактивными семействами, в которых родоначальники ряда - изотопы U235, U238 и Th232 называют материнскими, а продукты распада – дочерними. Цепочка распада заканчивается образованием стабильного изотопа. Ряд изотопа U235 заканчивается стабильным изотопом свинца двести седьмого, ряд U238 – изотопом свинца двести шестого, а ряд Th232 – свинцом двести восьмым. Для изотопа Th232 изменение атомной массы в ряду характеризуется выражением 4n, для изотопа U238 – 4n+2, а для изотопа U235 – 4n+3.

 …;

…;

.

Четвертое радиоактивное семейство искусственное. Родоначальником ряда является сравнительно короткоживущий изотоп нептуния 237 с периодом полураспада меньше возраста земли. Он распадается с образованием дочерних продуктов с атомной массой 4n+1. Заканчивается ряд стабильным изотопом висмута – 209.

….

Ядра радиоактивных изотопов могут не только распадаться, но и делиться.

Процесс деления ядер происходит с участием нейтронов-активаторов и сопровождается ассиметричным делением ядра с образованием двух неравноценных ядер (X и Y), выделением двух-трех нейтронов и огромного количества энергии Q в соответствии с приведенным уравнением деления ядер урана 235.

+ = X+Y+(2-3) + Q

При делении одного килограмма  выделяется энергия, равная ста миллиардам килоджоулей.

К самопроизвольно делящимся изотопам относятся природный изотоп  и изотопы , , , которые искусственно получают в ядерных реакторах. В соответствии с приведенными реакциями изотоп урана 233 образуется в атомном реакторе при облучении тория 232 потоком нейтронов с последующим β–распадом возбужденного ядра тория 233 и образующегося ядра протактиния 233. А изотопы плутония образуются при облучении урана 238 нейтронами. Два β–распада вначале возбужденного ядра урана 239, а затем нептуния 239 приводят к образованию плутония 239.

+

+

Не контролируемый поток нейтронов, образующихся при делении ядер, приводит к цепному механизму протекания реакции деления ядер и тепловому взрыву.

Реакция деления ядер по цепному механизму представлена на схеме:



На схеме можно видеть как каждый выделяющийся нейтрон, сталкиваясь с соседним ядром урана, вызывает его деление и появление новых двух-трех нейтронов. Этот процесс протекает лавинообразно в арифметической прогрессии.

1.3. **Закон радиоактивного распада. Радиоактивное равновесие.**

Закон радиоактивного распада в дифференциальной форме описывается следующим уравнением:

,

где N – число радиоактивных ядер;  – активность вещества; λ – вероятность распада радиоактивного ядра в определенном энергетическом состоянии, то есть скорость распада. Это константа характерна для каждого радионуклида и не зависит ни от каких физических параметров.

После интегрирования получаем выражение:

, (1.1)

где  – начальное число ядер;  – число ядер, оставшееся к моменту времени τ.

Графически закон радиоактивного распада представляет собой асимптотическую зависимость убыли оставшихся ядер от времени с начальной точкой отсчета Н0 на оси ординат. Закон радиоактивного распада изображен на рисунке 1.1.



Рис.1.1 Закон радиоактивного распада

Период полураспада, это время, за которое распадается половина ядер от их исходного числа и обозначается заглавной буквой Т с индексом одна вторая.

Найдем взаимосвязь периода полураспада и постоянной распада.

Логарифмируя уравнение (1.1) получим выражение:

.

Для периода полураспада отношение N к N0 равно одной второй:.

Тогда логарифмическое выражение закона распада для периода полураспада примет вид:

,

.

После преобразования получаем выражение, связывающее период полураспада с постоянной распада λ:

,

где  - период полураспада, то есть время, за которое распадается половина ядер от их исходного числа.

Закон радиоактивного распада в логарифмических координатах  от времени представляет прямую с отрицательным углом наклона (рис.1.2). Причем, тангенс угла наклона θ равен постоянной распада данного изотопа, а проекция отрезка с наклонной прямой на ось времени показывает период полураспада исследуемого изотопа. Отрезок на наклонной прямой определяется как проекция отрезка длиной 0,693 с оси ординат, что соответствует логарифму двух.



Рис.1.2. Закон радиоактивного распада в логарифмических координатах

Рассмотрим теперь закон радиоактивного распада для системы двух веществ, находящихся в генетической связи, материнского и дочернего веществ. Дифференциальное уравнение содержит в правой части два члена, первый из которых учитывает скорость накопления атомов дочернего вещества за счет распада материнского, а второй – скорость распада атомов дочернего вещества.

Графически кривая накопления – В и кривая распада – А имеют вид, представленный на рисунке 1.3. Очевидно, что в точке пересечения кривых скорости накопления и распада равны. Такое состояние системы из двух веществ характеризуется наступлением равновесия. Время установления равновесия определяется периодом полураспада дочернего, а не материнского вещества. Для любого естественного радиоактивного семейства периоды полураспада всех звеньев соответствующей цепочки малы по сравнению с периодами полураспада родоначальника ряда ,  или . Поэтому за время, большее, чем период полураспада наиболее долгоживущего из дочерних веществ, но меньшее, чем период полураспада ,  или соответственноуспевает установиться такое радиоактивное равновесие между всеми членами ряда, что числа образующихся и распадающихся в единицу времени ядер любого члена семейства равны, то есть активности, выраженные через произведение постоянной распада и числом ядер для каждого члена радиоактивного семейства равны:…



Рис.1.3. Радиоактивное равновесие

1.4. **Ядерное топливо. Ядерный топливный цикл.**

**Ядерное топливо для атомных реакторов.**

В основе работы атомного реактора лежит процесс получения тепловой и электрической энергии. Эта энергия вырабатывается в процессе осуществления управляемой реакции деления делящегося изотопа урана-235 под действием нейтронов в активной зоне реактора. Тепловая энергия передается от тепловыделяющей сборки теплоносителю, теплоноситель поступает в парогенератор, образующийся в парогенераторе пар поступает на лопатки турбины. Турбогенератор вырабатывает электроэнергию, которая передается в регионы.

Таким образом, топливом атомного реактора должен быть спонтанно делящийся изотоп. Этими свойствами, как мы знаем, обладают четыре изотопа: два изотопа урана - двести тридцать третий и двести тридцать пятый и два изотопа плутония – двести тридцать девятый и двести сорок первый.

Атомная энергетика использует изотоп урана-235 в качестве ядерного топлива так как он является природным спонтанно делящимся изотопом.

Источником топлива является природный уран, изотопный состав которого включает три изотопа урана: уран-238, уран-235 и уран-234, смотри таблицу 1.2.

Содержание изотопа U-238 – 99,28%; U-235 – 0,715%, а U-234 – 0,005%. Все изотопы являются альфа-излучателями.

Таблица 1.2. Изотопный состав природного урана

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Изотоп | Содержание, % | Период полураспада Т1/2, лет | Тип распада |
|  | 99,28 | 4,5∙109 | α |
|  | 0,715 | 7,13∙108 | α |
|  | 0,005 | 2,5∙105 | α |

Доля делящегося изотопа урана-235 мала для использования в атомном реакторе, поэтому необходимо проводить обогащение до трех – пяти процентов урана-235. Таким образом, ядерное топливо состоит на три – пять процентов из изотопа урана-235, остальное изотоп урана-238.

В перспективе рассматривается использование топлива на основе спонтанно делящегося изотопа урана-233. Второй компонент топлива – природный изотоп   
тория-232 служит для воспроизводства изотопа урана-233 в атомном реакторе.

**Ядерный топливный цикл (ЯТЦ)**

В настоящее время во всем мире, включая Россию, в ядерной энергетике используется уран-плутониевый ядерный топливный цикл, в котором делящимся материалом является уран-235 или плутоний-239, воспроизводящим – уран-238.

Ядерный топливный цикл представляет собой совокупность переделов ядерного топлива, включающую предприятия разного профиля, связанных единой технологической цепью.

Стадии уран-плутониевого цикла включают:

* Добычу из недр и переработка урановой руды.
* Производство гексафторида урана и разделение изотопов урана.
* Изготовление тепловыделяющих элементов.
* Получение ядерной энергии на атомных электростанциях.
* Радиохимическую переработку отработанного ядерного топлива.
* Переработку, обезвреживание и захоронение радиоактивных отходов.
* Хранение и транспортировку радиоактивных веществ между отдельными звеньями топливного цикла.