

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение

высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯТШ

_____ О.Ю. Долматов
« __ » _____ 2021 г.

В.А. Карелин

ЭКСТРАКЦИЯ ТРИБУТИЛФОСФАТОМ

Учебное пособие по учебной дисциплине «Радиохимия»
для студентов IV курса, обучающихся по направлению 18.05.02
«Химическая технология материалов
современной энергетики»

Издательство
Томского политехнического университета
2021

УДК 543.52:546.791

ББК 00000

A00

Карелин В.А.

A00 Описание лабораторной работы по Радиохимии «Экстракция трибутилфосфатом» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики» / В.А. Карелин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 22 с.

УДК 543.52:546.791

ББК 00000

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано
к изданию методическим семинаром отделения
ядерно-топливного цикла ИЯТШ
«___»_____ 2021 г.

Руководитель отделения
кандидат технических наук, доцент

_____ *А.Г. Горюнов*

© ФГБОУ
ВПО НИ
ТПУ, 2021
© Карелин
В.А., 2021

Содержание

1	Экстракция трибутилфосфатом	4
1.1	Теоретические основы процесса	4
1.1.1	Общая характеристика экстракции	4
1.1.2	Классификация экстрагентов и механизмов экстракции соединений урана	4
1.1.3	Экстракция нейтральными экстрагентами	7
1.2	Методика проведения исследований	10
1.2.1	Реактивы, посуда	10
1.2.2	Последовательность выполнения исследований ...	11
1.2.3	Ферро-фосфатно-ванадатный метод определения концентрации урана	13
2	Вопросы (для самоконтроля)	17
	Список литературы	17

1. Экстракция трибутилфосфатом

1.1. Теоретические основы процесса

1.1.1. Общая характеристика экстракции

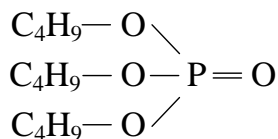
Экстракция – это извлечение какого-либо вещества из одной фазы в другую (от латинского *extrago* – вытягиваю, извлекаю). В более узком смысле можно говорить о жидкостной экстракции. **Жидкостная экстракция** – это процесс извлечения вещества из одной жидкой фазы (обычно водного раствора) в другую (обычно органическую). В настоящее время жидкостную экстракцию широко применяют в аналитической и препаративной химии, в физико-химических исследованиях, в технологии для извлечения и очистки цветных и редких металлов, в радиохимии и радиохимической технологии для разделения и очистки радиоактивных элементов и отдельных радионуклидов. Органическая фаза при экстракции может состоять из одного вещества, которое называют **экстрагентом** или может содержать разбавитель, а также другие добавки. Экстрагент образует с веществом, извлекаемым из водной фазы в органическую, **экстракционное соединение**. Как и экстрагент, экстракционное соединение мало растворимо в водной и хорошо растворимо в органической фазе. При этом извлекаемое вещество переходит из водной фазы в органическую. На практике органическая фаза чаще всего представляет собой многокомпонентный раствор, в котором кроме экстрагента (Э) и экстракционного соединения (ЭС) присутствует разбавитель, а иногда и другие компоненты. **Разбавитель** – инертный органический растворитель, используемый для растворения твердых экстрагентов, для повышения растворимости экстракционного соединения в органической фазе, а также для улучшения гидродинамических свойств органической фазы (уменьшения вязкости, изменения или увеличения плотности).

1.1.2. Классификация экстрагентов и механизмов экстракции соединений урана

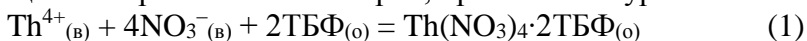
Рассмотрим экстрагенты и наиболее характерные для них механизмы по классификации, принятой в технологии.

Первая группа – нейтральные экстрагенты.

К этой группе экстрагентов относятся кислородсодержащие растворители: спирты, простые и сложные эфиры, альдегиды, кетоны и нейтральные фосфорорганические соединения. Например, нейтральным экстрагентом является **трибутиловый эфир фосфорной кислоты – трибутилфосфат (ТБФ):**

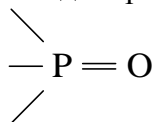


ТБФ способен экстрагировать четырех- и шестивалентные актиноиды из азотнокислых водных растворов. Например, экстракция четырехвалентного тория, протекает по уравнению:



Нижние индексы (в) и (о) обозначают водную и органическую фазы.

Образующееся по реакции (4.1) экстракционное соединение $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 2\text{ТБФ}$ представляет собой координационное (комплексное) соединение, в котором электроно-донорный атом кислорода фосфорильной группы



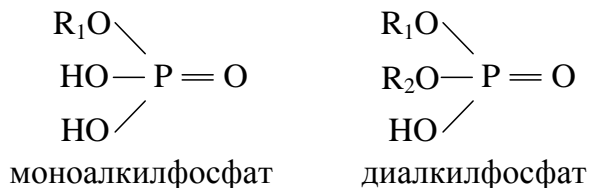
образует донорно-акцепторную связь с экстрагируемым металлом.

Образование такого экстракционного соединения рассматривают как процесс сольватации экстрагируемой соли металла экстрагентом.

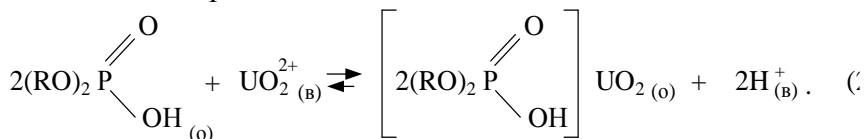
В реакции (1) образуется **дисольват нитрата тория с ТБФ.**

Рассмотренный механизм экстракции с образованием в органической фазе сольватов называется **сольватным или координационным**.

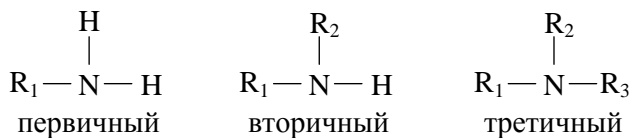
2-я группа – органические кислоты, например, ацетилацетон, теноилтрифторацетон, кислые алкилфосаты:



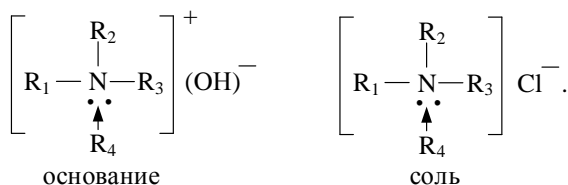
Экстракция урана экстрагентами 2-ой группы протекает по **катионообменному механизму**. В этом случае экстрагируемый металл в форме катиона переходит в органическую фазу, замещая водород органической кислоты, являющейся экстрагентом:



3-я группа экстрагентов – органические амины. Амины – это продукты замещения водорода в аммиаке на органические радикалы:

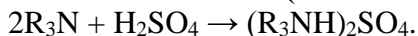


К аминам относятся такие **четвертичные аммониевые основания (ЧАО) и их соли**:

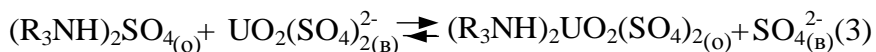


В аминах, как и в аммиаке, азот имеет неподеленную пару электронов, что обуславливает их способность к образованию координационных соединений.

Подобно аммиаку амины взаимодействуют с кислотами с образованием соли амина (алкиламмония):



Соли аминов являются экстрагентами. Например, сульфат триалкиламмония взаимодействует с дисульфатом уранила по реакции:

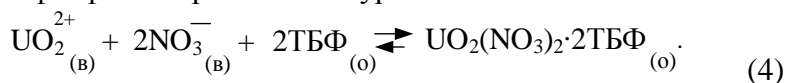


Этот механизм экстрагирования является по существу анионообменным и амины ведут себя подобно анионообменной смоле (только жидкой).

1.1.3. Экстракция нейтральными экстрагентами

Из нейтральных экстрагентов в химической технологии урана наибольшее распространение получил трибутилфосфат. ТБФ является эффективным экстрагентом для четырех- и шестивалентных актиноидов из азотнокислых водных растворов. ТБФ удовлетворительно экстрагирует тяжелые трехвалентные элементы при создании соответствующих условий и плохо или совсем не экстрагирует одно- и двухвалентные элементы.

Экстракция азотнокислой соли уранила трибутилфосфатом протекает по уравнению:



Из уравнения видно, что ТБФ экстрагирует уранилнитрат в виде безводного сольвата с молекулярным соотношением нитрата к ТБФ, равным 1:2, т.е. в виде дисольвата нитрата уранила.

Реакцию экстрагирования урана можно охарактеризовать концентрационной константой равновесия, которая для реакции (4) имеет вид:

$$K_U = \frac{[UO_2(NO_3)_2 \cdot 2ТБФ]_{(o)}}{[UO_2^{2+}]_{(в)} \cdot [NO_3^-]_{(в)}^2 \cdot [ТБФ]_{(o)}^2} \cdot \frac{\gamma_{эс}}{\gamma_{\pm}^3 \cdot \gamma_3^2}, \quad (5)$$

где квадратные скобки обозначают равновесные концентрации соответствующих веществ;

$\gamma_{эс}$, γ_3 , γ_{\pm} – коэффициенты активности сольвата, экстрагента и средний коэффициент активности электролита.

С количественной стороны экстракция данного металла характеризуется коэффициентом распределения α , представляющим собой отношение общих (аналитических) концентраций металла в органической и водной фазах, находящихся в равновесии:

$$\alpha = \frac{c_{U(o)}}{c_{U(в)}} = \frac{[UO_2(NO_3)_2 \cdot 2ТБФ]_{(o)}}{[UO_2^{2+}]_{(в)}}. \quad (6)$$

Подставляя (4.6) в (4.5) получаем **уравнение изотермы экстракции** уранил-нитрата трибутилфосфатом (4.2):

$$\alpha_U = K_U \cdot [NO_3^-]_{(в)}^2 \cdot \frac{\gamma_{\pm}^3 \cdot \gamma_3^2}{\gamma_{эс}}. \quad (7)$$

Природа экстрагируемого соединения, экстрагента и температура оказывают влияние на коэффициент распределения через константу K . Из уравнения изотермы экстракции видно, что коэффициент распределения представляет собой сложную функцию концентраций анионов и экстрагента, а также коэффициентов активности реагирующих веществ, и поэтому в общем случае является переменной величиной.

На рис. 1 приведена полученная экспериментально зависимость коэффициента распределения α от концентрации $UO_2(NO_3)_2$.

Изотермы экстракции отражают и влияние неэкстрагирующейся соли или кислоты с одноименным анионом. Такие соединения при введении их в экстракционную систему увеличивают коэффициенты распределения экстрагирующихся соединений и называются высаливателями.

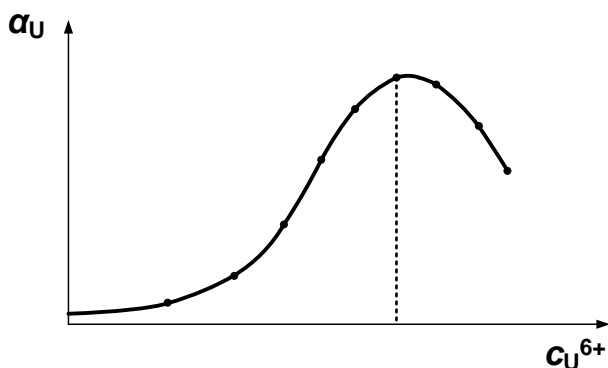


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения урана от его концентрации в водной фазе при экстракции ТБФ

При экстракции ТБФ нитратов актиноидов, лантаноидов в качестве высаливателей применяют азотную кислоту и неэкстрагируемые нитраты одно-, двух- и трехвалентных металлов (щелочных, щелочноземельных, Al, Fe и т.д.).

Как видно из уравнения (4.7) **увеличение концентрации анионов NO_3^- , относящихся к высаливателю, приводит к увеличению коэффициента распределения α** . Этот эффект вытекает из закона действующих масс и не зависит от индивидуальности высаливателя. Однако, экспериментально установлено, что **α зависит от природы и концентрации катиона высаливателя**, которое объясняется его гидратацией. **Чем больше гидратирован катион высаливателя, тем сильнее он увеличивает коэффициент распределения**. Этот эффект обусловлен тем, что **катион высаливателя в водном растворе понижает концентрацию свободной воды за счет собственной гидратации**.

Сильными высаливателями для $UO_2(NO_3)_2$ являются $LiNO_3$, $Mg(NO_3)_2$ и $Al(NO_3)_3$.

Коэффициент распределения α имеет важное значение в технологии экстракционных процессов. Существует ряд

зависимостей α от условий проведения экстракционного процесса.

1. **Чем выше коэффициент распределения α , тем большее количество вещества можно извлечь за одну операцию (контакт) экстрагирования.** Поэтому желательно использовать экстрагенты с высокими коэффициентами распределения. При коэффициенте распределения, равном 10, уже при одном контакте извлечение составляет 90 %. Однако и при сравнительно невысоком значении α можно добиться хорошего извлечения повторением операций экстрагирования. Даже для такого низкого коэффициента распределения, равного 1, за пять контактов можно получить 97 %-ное извлечение ($0,50 + 0,25 + 0,125 + 0,063 + 0,032 = 0,97$ или 97 %).

2. **Различия коэффициентов распределения ценного компонента и примесей позволяют эффективно их разделить в процессе экстракции.**

3. **Даже при небольшом различии в коэффициентах распределения двух химически близких веществ существует возможность их разделения и выделения экстракционным методом.** Например, экстракция дает возможность разделить близкие по свойствам U и Pu, Nb и Ta и т.п.

1.2. Методика проведения исследований

Цель работы – проведение процесса экстракционного извлечения U^{6+} из нитратного раствора трибутилфосфатом в синтине или бензине галоша с высаливателем и без высаливателя и определение коэффициента распределения урана α_U , а также изучение влияния высаливателя на величину коэффициента распределения.

1.2.1. Реактивы, посуда

- трибутилфосфат (ТБФ) – 20 мл.;
- синтин или бензин галоша – 25 мл.;
- натрия карбонат Na_2CO_3 , 10 %-ный раствор – 50 мл.;

- азотная кислота HNO_3 , 10 %-ный раствор – 25 мл.;
- уранилнитрат $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, 0,2 М раствор – 50 мл.;
- алюминий азотнокислый 40 %-ный раствор – 10 мл.,
приготавливается из кристаллогидрата $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$;
- колбы конические на 100 мл – 4 шт.;
- пробирки пластиковые на 10 мл. – 4 шт.;
- пробирки мерные на 10 мл. – 4 шт.;
- микропипетка – 1 шт.;
- делительные воронки на 100 мл – 3 шт.;
- цилиндры мерные объемом 10 и 50 мл – по 3 шт.;
- конические колбы объемом 100 мл – 2 шт.;
- конические колбы на 250 мл – 4 шт.;
- бюретка на 25 мл – 1 шт.;
- пипетки на 1 и 5 мл – по 5 шт.;
- штатив для бюретки – 1 шт.;
- плитка электрическая;
- ортофосфорная кислота H_3PO_4 , концентрированная ($d = 1,6 \text{ г/мл}$) – 15 мл.;
- соль Мора $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 10 % раствор в 0,5 н. H_2SO_4 – 5 мл.;
- азотная кислота, концентрированная – 1 мл.;
- мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, 10 % раствор – 20 мл.;
- дифениламиносульфонат натрия, 0,5 % раствор в 2 н. H_2SO_4 – 1 мл.;
- ванадат аммония NH_4VO_3 , 0,042 н. раствор – 30 мл.

1.2.2. Последовательность выполнения исследований

1.2.2.1. При проведении экстракции ТБФ применяют легкий разбавитель – синтин или бензин галоша. Для этого приготавливают органическую фазу (ОФ) – 30 %-ный об. раствор ТБФ в синтине или бензине галоша. Объем ОФ – 25 мл. Для этого берут 7,5 мл ТБФ и 17,5 мл синтина или бензина галоша.

1.2.2.2. Приготовленный 30 %-ный об. раствор ТБФ в синтине или бензине галоша промывают 10 %-ным раствором

Na_2CO_3 . Для этого приготовленный органический раствор контактируют (энергично встряхивают) в делительной воронке с 10 %-ным раствором Na_2CO_3 , соотношение объемов 1:1. Разделяют водную и органическую фазы. Водную фазу сливают в отходы.

1.2.2.3. Раствор ТБФ в синтине или бензине галоша, обработанный содой, контактируют с 10 %-ным раствором HNO_3 , соотношение объемов 1:1. Разделяют водную и органическую фазы. Водную фазу сливают в отходы.

1.2.2.4. Раствор ТБФ в синтине или бензине галоша промывают водой, соотношение объемов органической и водной фаз 1:1. Операцию промывки водой проводят дважды.

Подготовленную таким образом органическую фазу используют для экстракционного извлечения урана без высаливателя и с высаливателем.

1.2.2.5. Экстракция без высаливателя.

1.2.2.5.1. Проводят экстракционное извлечение урана ТБФ из водного азотнокислого раствора уранилнитрата без высаливателя при соотношении объемов О:В = 1:2.

Для этого в пластиковую пробирку с притертой пробкой вносят 5 мл 20 %-ного раствора уранил-нитрата и 2,5 мл 30 %-ного раствора ТБФ в синтине или бензине галоша. Пробирку закрывают пробкой и встряхивают в течение 3 минут.

1.2.2.5.2. После расслаивания фаз верхний органический слой осторожно удаляют с помощью микропипетки в мерную пластиковую пробирку.

1.2.2.5.3. Органическую фазу сливают в специальную колбу для отходов, содержащих органические жидкости. Из водной фазы пипеткой в мерную пробирку отбирают 1 мл раствора на анализ.

1.2.2.6. Экстракция с высаливателем.

1.2.2.6.1. Проводят экстракционное извлечение урана ТБФ из водного азотнокислого раствора уранилнитрата с высаливателем при соотношении объемов О:В = 1:2.

Для этого в пластиковую пробирку с притертой пробкой вносят 5 мл 20 %-ного раствора уранил-нитрата $UO_2(NO_3)_2$, 2,5 мл 30 %-ного раствора ТБФ в синтине или бензине галоша и 3 мл 40 %-ного нитрата алюминия $Al(NO_3)_3$. Пробирку закрывают пробкой и встряхивают в течение 3-х минут.

1.2.2.6.2. После расслаивания фаз верхний органический слой осторожно удаляют с помощью микропипетки в мерную пластиковую пробирку.

1.2.2.6.3. Органическую фазу сливают в специальную колбу для отходов, содержащих органические жидкости. Из водной фазы пипеткой в мерную пробирку отбирают 1 мл раствора на анализ.

1.2.2.7. Определяют концентрацию урана в пробах, отобранных из водных фаз с высаливателем и без высаливателя экспрессным **ферро-фосфатно-ванадатным методом**.

1.2.3. Ферро-фосфатно-ванадатный метод определения концентрации урана

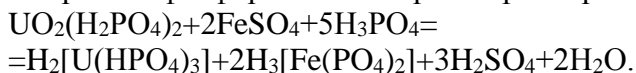
Этот метод основан на титровании U^{6+} ванадатом аммония NH_4VO_3 в присутствии индикатора – дифениламиносульфоната натрия.

Пробу анализируемого раствора $UO_2(NO_3)_2$ сначала обрабатывают избытком ортофосфорной кислоты при кипячении для удаления азотной кислоты и перевода всего U^{6+} в кислый фосфат по реакции:

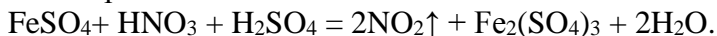


Присутствие в растворе азотной кислоты приведет в дальнейшем на операции восстановления урана к уничтожению (окислению) восстановителя.

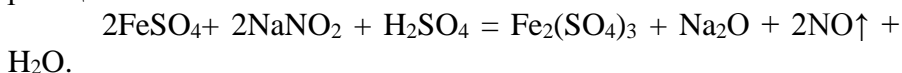
После этого U^{6+} восстанавливают до U^{4+} железом (2+) в избытке горячего фосфорнокислого раствора по реакции:



Избыток Fe^{2+} и восстановленные примеси (Mo, As и др.) окисляют на холоду азотной кислотой до высших степеней окисления по реакции:



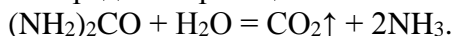
Процесс окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} более эффективно проводить при использовании в качестве окислителя NaNO_2 по реакции:



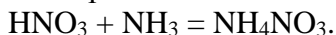
U^{4+} в это время находится в растворе в виде прочного фосфатного комплекса и при температуре 15-20 °С не окисляется.

Далее избыточную азотную кислоту связывают мочевиной. Этот процесс протекает в две стадии.

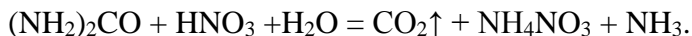
Вначале мочевина подвергается гидролизу в кислой и щелочной средах по реакции:



Затем выделившийся аммиак взаимодействует с азотной кислотой по реакции:

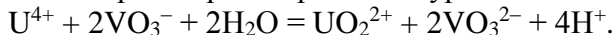


Таким образом, процесс описывается суммарной реакцией:



При неполном удалении азотной кислоты из раствора определения концентраций урана в анализируемом растворе будет заниженным. Признаком полного удаления HNO_3 является отсутствие пузырьков выделяющегося газа.

Далее раствор U^{4+} титруют раствором ванадата аммония. Суммарная реакция окисления урана (4+) ионами ванадия (5+) в сильноокислых растворах выражается уравнением:



1.2.3.1. Последовательность операций при проведении анализа ферро-фосфатно-ванадатным методом

1.2.3.1.1. Пробу анализируемого раствора, содержащего от 25 до 100 мг U^{6+} , объемом 1 мл помещают в коническую колбу на

250 мл и добавляют 15 мл концентрированной ортофосфорной кислоты.

1.2.3.1.2. Раствор нагревают до кипения и кипятят 4-6 минут (не более!!!), так как длительное кипячение приведет к пригоранию ортофосфорной кислоты на дне колбы.

1.2.3.1.3. Затем раствор охлаждают до 80-90 °С, разбавляют водой до 25 мл и тщательно перемешивают.

После этого к раствору добавляют 5 мл 10 % раствора соли Мора в 0,5 N серной кислоте и снова тщательно перемешивают.

1.2.3.1.4. Полученный раствор нагревают до кипения на плитке и затем охлаждают до 15-20 °С.

1.2.3.1.5. Затем к раствору добавляют 5 мл 10 %-ного раствора NaNO_2 .

1.2.3.1.6. Далее к раствору при энергичном перемешивании добавляют порциями по 0,2-0,3 мл концентрированной азотной кислоты до тех пор, пока не исчезнет появляющаяся вначале коричневая окраска. Исчезновение коричневой окраски указывает на окончание окисления Fe^{2+} .

Цвет раствора становится таким, каким он был до приливания азотной кислоты.

1.2.3.1.7. После этого к раствору сразу же добавляют при тщательном перемешивании 15-20 мл 10 % раствора мочевины, 2-3 капли 0,5 % раствора дифениламиносульфоната натрия и титруют 0,042 N раствором ванадата аммония до появления устойчивой фиолетовой окраски.

1.2.3.1.8. При расчете количества U^{6+} в пробе принимают, что 1 мл раствора ванадата аммония соответствует 4,99 мг урана.

Концентрацию урана в исследуемом урансодержащем растворе рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{4,99V_2 \cdot 1000}{V_1 \cdot 1000} = \frac{4,99V_2}{V_1}, \text{ г/л,}$$

где V_1 – объем исходного урансодержащего раствора, мл;

V_2 – объем 0,042 N раствора ванадата аммония, пошедшего на титрование, мл.

1.2.3.1.9. Вычисляют равновесные концентрации урана в органических фазах, используя при расчетах исходную концентрацию урана, равновесную концентрацию в водных фазах, а также равновесные объемы водной и органической фаз при экстракции с высаливателем и без него.

По закону эквивалентов для $UO_2(NO_3)_2$:

$$V_{(B)} \cdot N_{(B)} = V_{(O)} \cdot N_{(O)}, \quad (8)$$

где $V_{(B)}$ и $V_{(O)}$ – объемы водной и органической фаз уранил-нитрата, мл;

$N_{(B)}$ и $N_{(O)}$ – концентрации уранил-нитрата в водной и органической фазах, мг-экв/мл.

Из уравнения (4.8) выразим $N_{(O)}$:

$$N_{(O)} = \frac{V_{(B)} \cdot N_{(B)}}{V_{(O)}}. \quad (9)$$

Величины $V_{(B)}$, $V_{(O)}$ и $N_{(B)}$ из условий эксперимента известны.

В результате получают две величины концентрации $UO_2(NO_3)_2$ – при проведении экстракции с высаливателем и без него $N_{(O)'}^{\prime}$ и $N_{(O)''}^{\prime\prime}$.

4.2.3.1.10. Вычисляют коэффициенты распределения α' и α'' делением равновесной концентрации урана в органической фазе $N_{(O)'}^{\prime}$ и $N_{(O)''}^{\prime\prime}$ на равновесную концентрацию урана в водной фазе при экстракции с высаливателем и без него:

$$\alpha' = \frac{N_{(O)'}^{\prime}}{N_{(B)}}, \quad (10)$$

$$\alpha'' = \frac{N_{(O)''}^{\prime\prime}}{N_{(B)}}. \quad (11)$$

4.2.3.1.11. Для того чтобы установить влияние высаливателя на экстракционное извлечение урана ТБФ необходимо сравнить коэффициенты распределения α' и α'' с высаливателем и без него.

2. Вопросы (для самоконтроля)

1. Характеристика и основные понятия процесса экстракции.
2. Классификация экстрагентов и механизмов экстракции соединений урана.
3. Экстракция нейтральными экстрагентами.
4. Уравнение экстракции уранилнитрата ТБФ и константа равновесия.
5. Коэффициент распределения процесса уранилнитрата ТБФ и его зависимость от условий проведения процесса.
6. Уравнение изотермы экстракции.
7. Зависимость коэффициента распределения от концентрации уранилнитрата в процессе его взаимодействия с ТБФ.
8. Понятие высаливателя и его роль в процессе экстракционного выделения урана.
9. Особенности проведения процесса экстракции урана с высаливателем и без него.
10. Основы ферро-фосфатно-ванадатного метода определения концентрации урана.
11. Основные реакции при проведении ферро-фосфатно-ванадатного метода определения концентрации урана.
12. Последовательность операций при проведении анализа ферро-фосфатно-ванадатным методом.
13. Методика расчета коэффициента распределения урана с высаливателем и без него.

Список литературы

1. Бекман И.Н. Радиоактивность, радиация и радионуклиды. Palmarium academic publishing, Saarbrucken, Германия. – 2013. – 497 с.
2. The chemistry of actinide and transactinide elements. – V. 1-6 (Edit. L.R. Morss, N.M. Edelstein, J. Fuger), Springer, The Netherlands, 2010. – 4200 P.

3. Николаев А.В., Афанасьев Ю.А. и др. Краткий курс радиохимии. – М.: Высшая школа, 1969.
4. Фомин В.В. Кинетика экстракции. – М.: Атомиздат, 1978. – 120 с.
5. Фомин В.В. Химия экстракционных процессов. – М.: Атомиздат, 1960. – 166 с.
6. Судариков Б.Н., Раков Э.Г. Процессы и аппараты урановых производств. – М.: Машиностроение, 1968. – 381 с.
7. Николотова З.Н. Экстракция нейтральными органическими соединениями. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
8. Альдерс Л. Жидкостная экстракция. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 258 с.
9. Марков В.К., Виноградов А.В. и др. Уран, методы его определения. – М.: Атомиздат, 1960.
10. МВИ 36-2014 Растворы технологические ураносодержащие. Определение массовой концентрации урана ферро-фосфатно-ванадатным методом / Рег. № КЗ.07.00.02056-2014 / Назначение: устанавливает титриметрический ферро-фосфатно-ванадатный метод определения массовой концентрации урана. Режим доступа: <https://kazinmetr.kz/bd/reestr/mvi/7145/>
11. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Уран. Методика ферро-фосфатно-ванадатного определения в технологических продуктах. ОИ 001.446-98. Режим доступа: http://www.fundmetrology.ru/06_metod/2view.aspx?id=21116

Учебное издание

КАРЕЛИН Владимир Александрович

ЭКСТРАКЦИЯ ТРИБУТИЛФОСФАТОМ

Учебно-методическое пособие

Корректурa *Д.В. Заремба*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати _____.
Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать CANON. Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____.
Заказ xxx-19. Тираж ___ экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ