

РАДЫЯХІМІЯ
RADIOCHEMISTRY

УДК 544.58
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-331-339>

Поступила в редакцию 10.06.2021
Received 10.06.2021

О. Б. Коренькова, А. В. Радкевич, Н. И. Вороник

*Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДА ^{106}Ru В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ
ПРИ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИИ, УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ И ИОННОМ ОБМЕНЕ**

Аннотация. Представлены результаты изучения закономерности поведения радионуклида ^{106}Ru в водных растворах в широком интервале pH методами ультрафильтрации, ионного обмена и центрифугирования. Установлены области существования различных форм ^{106}Ru в растворе: катионные формы ^{106}Ru существуют при $\text{pH} < 3,5$; переходная область формирования неионных форм находится в интервале $\text{pH} 3,5\text{--}4,2$ и область преимущественного образования неионных форм при $\text{pH} > 4,2$. Характерной особенностью изученных растворов является образование рутением-106 концентрацией 10^{-11} моль/дм³ неионных частиц за счет псевдоколлоидообразования при более низких значениях pH по сравнению с растворами рутения в концентрации $10^{-6}\text{--}10^{-4}$ моль/дм³. Установленные закономерности поведения радионуклидов рутения могут быть использованы для повышения эффективности способов ионного обмена и мембранного разделения при очистке технологических растворов и жидких радиоактивных отходов, образующихся на ядерных и радиационных объектах.

Ключевые слова: радионуклиды рутения, жидкие радиоактивные отходы, ионный обмен, ультрафильтрация, центрифугирование

Для цитирования. Коренькова, О. Б. Поведение радионуклида ^{106}Ru в водных растворах при центрифугировании, ультрафильтрации и ионном обмене / О. Б. Коренькова, А. В. Радкевич, Н. И. Вороник // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 331–339. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-331-339>

O. B. Korenkova, A. V. Radkevich, N. I. Voronik

*The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus*

**RADIONUCLIDE ^{106}Ru BEHAVIOR IN AQUEOUS SOLUTIONS BY CENTRIFUGATION,
ULTRAFILTRATION AND ION EXCHANGE METHODS**

Abstract. The paper presents the results of ^{106}Ru radionuclide behavior regularities study in aqueous solutions in a wide pH range by ultrafiltration, ion exchange and centrifugation methods. The regions of ^{106}Ru various species existence in solution have been established: cationic ^{106}Ru species at $\text{pH} < 3.5$; the transition region of non-ionic species formation in the range of $\text{pH} 3.5\text{--}4.2$ and the region of non-ionic species predominant formation at $\text{pH} > 4.2$. A characteristic feature of the studied solutions is the formation of non-ionic particles by microconcentrations of ^{106}Ru via pseudocolloids at lower pH values as compared to ruthenium solutions with a concentration of $10^{-6}\text{--}10^{-4}$ mol/dm³. The established regularities of the behavior of ruthenium radionuclides can be utilized to increase the efficiency of ion exchange and membrane separation methods at nuclear and radiation facilities for technological solutions and liquid radioactive waste treatment.

Keywords: ruthenium radionuclides, liquid radioactive waste, ion exchange, ultrafiltration, centrifugation

For citation. Korenkova O. B., Radkevich A. V., Voronik N. I. Radionuclide ^{106}Ru behavior in aqueous solutions by centrifugation, ultrafiltration and ion exchange methods. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 331–339 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-331-339>

Введение. Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), образующиеся при эксплуатации атомной электростанции (АЭС), содержат долгоживущие радионуклиды как осколочного, так и активационного происхождения [1]. Радионуклиды, как правило, присутствующие в микроконцентрациях в водных растворах, могут образовывать различные формы: гидратированные катионы,

моно- и полиядерные комплексы, псевдоколлоидные частицы. Спектр соединений радионуклидов, существующих при данных условиях, зависит от значения pH, наличия в растворе сторонних ионов, комплексообразователей, поверхностно-активных веществ. При этом установление конкретных форм радионуклидов, их состава, структуры, термодинамических и кинетических характеристик является исключительно сложной задачей из-за схожести физико-химических свойств и ограниченностью доступных методов исследования растворов, содержащих микроконцентрации элементов [2]. Для ряда радионуклидов, относящихся к переходным металлам и актинидам, проблематичным является даже установление «реперного» валентного состояния в растворе. Так, плутоний в водных растворах за счет протекания реакций диспропорционирования может одновременно существовать в степенях окисления от +3 до +6, что не позволяет связать полученные в эксперименте результаты со свойствами определенной валентной формы металл-иона [3].

В этой связи для решения практических задач, связанных с разработкой и внедрением эффективных способов очистки ЖРО от радионуклидов, целесообразным является установление условий образования и границ существования форм, существенно отличающихся по физико-химическим характеристикам. Одна из таких характеристик – разделение всех образующихся в растворах форм на ионные (катионные и анионные моно- и полиядерные комплексы) и неионные (коллоидные и псевдоколлоидные частицы), что является определяющим для предсказания закономерностей поведения радионуклидов в различных процессах разделения: ионном обмене, сорбции, мембранном разделении [4].

В настоящее время значительное внимание уделяется проблемам обращения с ЖРО, содержащими такие радионуклиды, как $^{134,137}\text{Cs}$, ^{90}Sr , $^{58,60}\text{Co}$, которые присутствуют в растворах как в катионной, так и в псевдоколлоидной формах [5, 6]. При этом необходимо учитывать, что существует ряд радионуклидов, которые способны образовывать в водных растворах анионные формы. К таким радионуклидам относятся в том числе и радионуклиды рутения.

В тепловыделяющих сборках энергетических реакторов изотопы рутения образуются за счет деления урана и трансурановых элементов [7–9]. В течение первых двух лет после удаления из активной зоны реактора радионуклиды рутения дают значительный вклад в общую активность отработавшего топлива [10]. В табл. 1 приведен радионуклидный состав изотопов рутения в отработавшем ядерном топливе через 5 лет выдержки [11]. Для реактора ВВЭР-1000 проекта В-320 в соответствии с данными, приведенными в [12], активность радионуклида ^{106}Ru составляет $6,76 \cdot 10^{14}$ Бк/твэл, а ^{103}Ru – $5,43 \cdot 10^{14}$ Бк/твэл. За счет выхода из под оболочек негерметичных твэлов в режимах нормальной эксплуатации активность радионуклида ^{106}Ru в теплоносителе первого контура АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 составляет порядка 20 Бк/кг, а ^{103}Ru – $4 \cdot 10^2$ Бк/кг; в случае нарушений нормальной эксплуатации и аварий данные величины могут многократно возрастать.

Таблица 1. Радионуклидный состав изотопов рутения в отработавшем ядерном топливе через 5 лет выдержки

Table 1. Radionuclide composition of ruthenium isotopes in spent nuclear fuel after 5 years of exposure

Изотоп	Доля, мас.%	Период полураспада	Активность, ГБк/г
^{99}Ru	Следовые количества	Стабильный	–
^{100}Ru	4,2	Стабильный	–
^{101}Ru	34,1	Стабильный	–
^{102}Ru	34,0	Стабильный	–
^{103}Ru	Следовые количества	39,247 дней	–
^{104}Ru	23,9	Стабильный	–
^{106}Ru	3,8	371,8 дней	300

Химия водных растворов рутения довольно сложна, поскольку рутений может существовать сразу в нескольких степенях окисления, а также формировать большое число комплексных ионов [13]. Также следует отметить, что рутений образует намного больше нитрозосоединений, чем какой-либо другой химический элемент. Данные соединения являются очень важной чертой химии рутения, поскольку группа RuNO^{3+} , которая присутствует как в анионных, так и в катионных комплексах, довольно устойчива к воздействию окислителей и восстановителей.

В соединениях рутений может проявлять степень окисления от +1 до +8. Ru(II) в водных растворах стабилизируется формированием комплексных соединений (например, Cl^- , NH_3 , NO^+). Ru(II) получают в результате восстановления Ru(III) различными соединениями (например, $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$, KCN , Cr^{2+} , HSO_3^-). В водных растворах наиболее устойчивы соединения рутения (III) и (IV). Ru(III) легко образует комплексные соединения с такими лигандами как F^- , Cl^- , OH^- , NH_3 , SO_3^{2-} и др. Координационное число практически во всех комплексах равно 6. Степень окисления +4 также довольно типична для рутения, многие соединения рутения в данной степени окисления легко восстанавливаются до Ru(III), иногда самопроизвольно. Данные соединения устойчивы в присутствии кислорода. Большое число комплексов Ru(IV) образует с галогенионами [14].

Рутенат-ион, RuO_4^{2-} , является единственным значимым комплексным ионом Ru(VI). Данный ион нестабилен в нейтральных или кислых растворах (диспропорционирует на Ru(IV) и Ru(VII)), но стабилен в щелочной среде. Ru(VII) в водных растворах в щелочной среде образует перрутенат-ион, RuO_4^- , который при $\text{pH} < 14$ нестабилен и водой восстанавливается до RuO_4^{2-} . В табл. 2 приведены примеры форм нахождения рутения в водных растворах [15].

Таблица 2. Примеры форм нахождения рутения в водных растворах

Table 2. Examples of ruthenium speciation forms in aqueous solutions

Степень окисления	Пример иона	Цвет раствора
II	$\text{Ru}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$	Голубой
III	$[\text{Ru}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]^{2+}$	
IV	$[\text{RuCl}_6]^{2-}$	Желтый
VI	RuO_4^{2-}	Оранжево-красный
VII	RuO_4^-	Желто-зелёный

Как отмечено в [16], в водных растворах азотной кислоты рутений, как правило, присутствует в степени окисления +3 в форме нитрозил-нитрата и нитрокомплексов. При этом при контакте с воздухом Ru(III) окисляется до Ru(IV), который в водных растворах образует за счет гидролиза сложные полиядерные гидроксокомплексы. Так, в работе [16] в растворе был идентифицирован полиядерный комплекс $\text{Ru}_4(\text{OH})_{12}^{4+}$. В соответствии с диаграммами Пурбе, представленными в [17], данный полиядерный комплекс существует в водных растворах при общей концентрации рутения 10^{-6} моль/дм³.

В работе [18] показано, что в интервале pH 3,5–7,0 при концентрации Ru (III) в растворе $2 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ наблюдается интенсивная сорбция радионуклида на поверхности стекла, обусловленная адсорбцией положительно заряженных соединений рутения на отрицательно заряженной поверхности стекла, а следовательно, и на коллоидных загрязнениях силикатной природы, всегда присутствующих в растворах.

При более низких концентрациях 10^{-12} – 10^{-9} моль/дм³, соответствующих содержанию радионуклидов ^{103}Ru и ^{106}Ru в технологических средах АЭС, можно ожидать образование мооядерных форм $\text{Ru}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Ru}(\text{OH})_2^+$ и $\text{Ru}(\text{OH})_4$. Необходимо также учитывать образование неионных (псевдоколлоидных) форм радионуклидов за счет сорбции на присутствующих в растворах продуктах коррозии и иных примесях.

Применяемые на АЭС с ВВЭР–1200 системы спецводоочистки теплоносителя первого контура, воды топливного бассейна, борного концентрата основаны на методе ионного обмена.

С учетом того что рутений в водных растворах образует целый ряд неионных соединений, эффективность таких систем спецводоочистки по отношению к радионуклидам рутения относительно невелика и оценивается в 25–75 %. Исследование форм нахождения радионуклидов рутения в водных средах позволит дать научно обоснованные предложения по разработке и внедрению эффективных и перспективных методов очистки технологических сред и ЖРО от указанных радионуклидов, сокращению объемов ЖРО и дозовых нагрузок на персонал АЭС.

Материалы и методы. Для экспериментального изучения состояния микроколичеств рутения в водных растворах методами ионного обмена, ультрафильтрации и центрифугирования использовали радионуклид ^{106}Ru с $T_{1/2} = 373,6$ сут (производитель – «Радиевый институт имени В. Г. Хлопина», раствор радионуклида ^{106}Ru в 2 моль/дм³ азотной кислоте). Рабочие растворы ^{106}Ru активностью порядка 200 кБк/дм³ готовили разбавлением исходного раствора в 0,1 моль/дм³ азотной кислоте; концентрация рутения в растворах составляла $1,5 \cdot 10^{-11}$ моль/дм³. Значение pH корректировали добавлением растворов KOH различной концентрации. Ионная сила всех растворов составляла 0,1. В экспериментах использовали реактивы марки «х.ч.».

Определение активности ^{106}Ru в растворах проводили на γ, β -спектрометре МКС АТ 1315. Аликвоты объемом 10 см³ измеряли в постоянной геометрии в течение 15 мин. Поскольку ^{106}Ru является чистым β -излучателем, определение активности в растворах проводили по γ -линии 512 кэВ дочернего продукта ^{106}Rh ($T_{1/2} = 29,8$ с) с квантовым выходом 20,4 %. Для установления равновесия между радионуклидами все растворы выдерживались перед измерением активности в течение 5 мин.

Поглощение ^{106}Ru при ионном обмене исследовали на сильнокислотном катионите гелевого типа Resinex KW-8 (начальная ионная форма Na^+ , размер гранул – 0,42–1,25 мм) и сильно-основном анионите Resinex A4 (начальная ионная форма Cl^- , размер гранул – 0,42–1,42 мм). Перед проведением экспериментов смолы были переведены в K^+ и NO_3^- -формы соответственно согласно методике, приведенной в [19]. Отношение объема раствора к массе ионита (V/m) составило 3000. Рабочие растворы с внесенной навеской ионообменной смолы перемешивали в течение суток со скоростью 200 об/мин на лабораторном встряхивателе для установления равновесия. Коэффициент распределения радионуклида ^{106}Ru на ионообменных смолах рассчитывали по формуле:

$$K_d = \frac{(A_0 - A_i) \cdot V}{A_i \cdot m}, \quad (1)$$

где A_0 и A_i – начальная и равновесная активность раствора, Бк/дм³; V – объем раствора, см³; m – масса сорбента, г.

При исследовании форм нахождения радионуклидов рутения в водных растворах методом ультрафильтрации использовали ячейку Millipore 8200 с мембраной из регенерированной целлюлозы Millipore Ultracel 1 kDa. Предел отсекающей мембраны составляет 1 kDa, что ориентировочно соответствует размеру пор 1 нм и обеспечивает полное задержание коллоидных и псевдоколлоидных частиц [20]. В соответствии с рабочим диапазоном мембраны растворы с pH 3,0–11,0 объемом 100 см³ пропускались при давлении 3 бар. Задержание ^{106}Ru ультрафильтрационной мембраной определяли по формуле:

$$R = \frac{(A_0 - A_i)}{A_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где A_0 и A_i – начальная активность раствора и i -й пробы после ультрафильтрации, Бк/дм³.

Центрифугирование проводили на лабораторной центрифуге ОПн-8 четырех образцов раствора объемом 25 см³. Скорость вращения центрифуги составляла 8000 об/мин, время вращения 30 мин. После центрифугирования производили отбор пробы верхней части раствора. Величину осаждения радионуклидов рутения определяли по формуле:

$$S = \frac{(A_0 - A_i)}{A_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где A_0 и A_i – начальная активность раствора и i -й пробы после центрифугирования, Бк/дм³. Все представленные ниже данные получены усреднением 3–5 результатов измерений.

Результаты и их обсуждение. Поведение ^{106}Ru в растворах в указанных экспериментальных условиях определяется преимущественно двумя основными процессами: частичным окислением Ru(III) до Ru(IV) за счет кислорода воздуха и гидролизом многозарядных катионов, образуемых этими валентными состояниями, что в свою очередь может приводить к образованию как ионных, так и неионных форм радионуклида [21].

Для определения времени установления равновесия между ионными и неионными формами рабочие растворы с ^{106}Ru выдерживались в течение различного времени (1 и 4 ч, 1 и 7 сут) после корректировки pH, а затем определяли поглощение ^{106}Ru ионитами. Полученные данные показали, что равновесие между формами рутения в водном растворе устанавливается менее чем за 1 ч, и увеличение времени выдержки не приводит к изменению коэффициентов распределения. В дальнейшем во всех экспериментах время выдержки растворов после корректировки pH и до проведения ионного обмена, центрифугирования или ультрафильтрации составляло 1 сут.

Результаты сорбции радионуклида ^{106}Ru из водных растворов в широком интервале pH ионообменными смолами представлены на рис. 1.

Согласно полученным данным, при $\text{pH} < 3,5$ ^{106}Ru поглощается преимущественно катионитом, в то время как коэффициент распределения на анионите значительно меньше. Это свидетельствует о присутствии в растворе рутения в катионной форме и фактическое отсутствие отрицательно заряженных форм. При этом в растворах с $\text{pH} < 2,0$ поглощение катионитом остается практически постоянным и несколько снижается в интервале pH 2,0–3,5. С учетом того что и Ru(III) и Ru(IV) образуют при низких значениях pH катионные формы [21], полученные данные могут соответствовать гидролитическому переходу от катионов с высоким зарядом (например, Ru^{3+}) к гидроксокомплексам $\text{Ru}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Ru}(\text{OH})_2^+$ с более низким зарядом по мере протекания гидролиза.

При pH 3,5 наблюдается резкое увеличение поглощения ^{106}Ru из растворов анионитом, а при pH 4,2 коэффициенты поглощения катионитом и анионитом сравниваются и далее совпадают

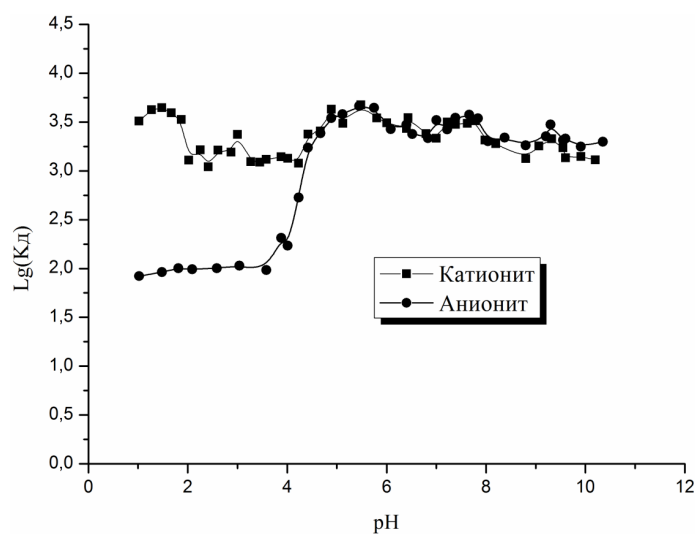


Рис. 1. Зависимость величины логарифма коэффициента распределения ^{106}Ru на катионите и анионите от значения pH раствора

Fig. 1. Dependence of the distribution coefficient logarithm of ^{106}Ru for cation and anion exchanger on pH value

во всем интервале pH 4,2–11,0. Такое поведение радионуклида характерно при образовании им неионных (псевдоколлоидных) форм в растворе, а поглощение ионитами в этом случае обусловлено адсорбцией содержащих ^{106}Ru частиц различного заряда на поверхности зерен смолы. Отсутствие отличий в поглощении ^{106}Ru катионитом и анионитом свидетельствует о преимущественном неионообменном механизме сорбции. Образование неионных форм рутения при pH выше 3,5 согласуется с результатами работы [18].

На рис. 2 представлены данные по задержанию ^{106}Ru мембраной при ультрафильтрации и осаждению при центрифугировании растворов. При значении pH 3,0 задержание ^{106}Ru ультрафильтрационной мембраной составляет порядка 11 %, что соответствует нахождению радионуклида при pH < 3,0 в ионной форме. В интервале pH от 3,5 и до 5,2 происходит рост задержания мембраной, что в свою очередь говорит о переходе ^{106}Ru из ионного состояния в неионное. При pH 5,2 задержание ^{106}Ru достигает значения 70–90 % и выходит на плато, соответствующее преимущественному нахождению ^{106}Ru в неионном состоянии.

Центрифугирование со скоростью 8000 об/мин в течение 30 мин обеспечивает седиментацию коллоидных (псевдоколлоидных) частиц размером более 50 нм [22]. Результаты проведенных экспериментов хорошо согласуются с данными по ультрафильтрации и показывают, что появление крупных псевдоколлоидных частиц, содержащих ^{106}Ru , начинается при pH 3,5. В интервале pH 5,5–9,0 порядка 70–80 % ^{106}Ru в растворе присутствует в составе псевдоколлоидных частиц размером более 50 нм; при дальнейшем повышении pH наблюдается некоторое снижение содержания неионных форм радионуклида.

Полученные результаты принципиально коррелируют с термодинамическими данными по состоянию рутения при концентрациях 10^{-6} – 10^{-4} моль/дм³ в водных растворах, которое при pH > 4,4 определяется образованием Ru(III) и Ru(IV) разнообразных нерастворимых продуктов гидролиза. При этом понижение концентрации металл-иона должно приводить к уменьшению области термодинамической стабильности таких соединений [21]. Однако явно наблюдаемым отличием в поведении микроконцентраций ^{106}Ru является образование значительных количеств неионных форм уже при pH 3,8–4,0 и их сохранением вплоть до pH 11,0. Данный факт может быть объяснен сорбцией моноядерных гидроксоформ рутения на сторонних частицах в растворе, т. е. псевдоколлоидообразованием, характерным именно для микроконцентраций компонентов.

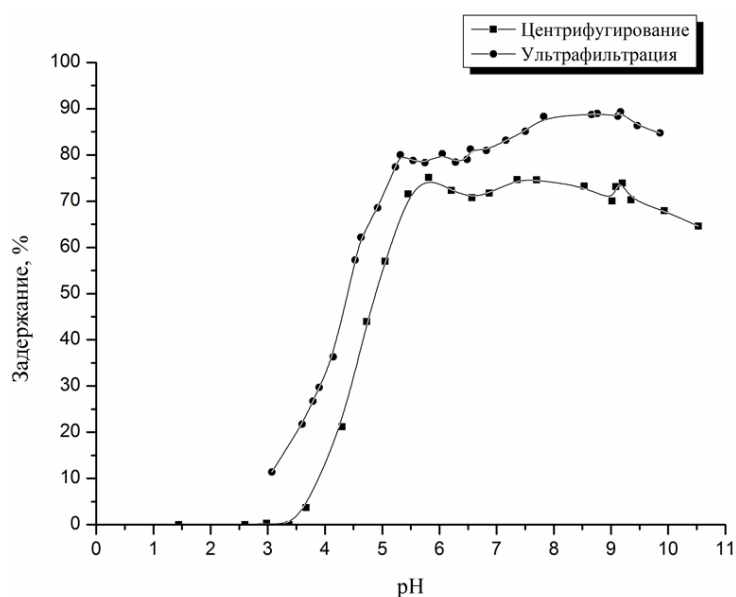


Рис. 2. Зависимость задержания ^{106}Ru мембраной при ультрафильтрации и осаждения при центрифугировании от значения pH раствора

Fig. 2. Dependence of the ^{106}Ru retention by the membrane during ultrafiltration and sedimentation during centrifugation on the pH value of the solution

Заклучение. В ходе работы определены условия образования и границы существования ионных и неионных форм радионуклида ^{106}Ru в водных растворах в широком интервале рН методами ионного обмена, ультрафильтрации и центрифугирования. Показано, что ^{106}Ru до рН 3,5 находится преимущественно в катионной форме, в интервале рН 3,5–4,2 происходит формирование неионной формы, и при рН > 4,2 основная часть радионуклида присутствует в растворе в составе псевдоколлоидных частиц размером более 50 нм. Характерной особенностью изученных растворов образование ^{106}Ru неионных частиц при более низких значениях рН по сравнению с растворами рутения при концентрациях 10^{-6} – 10^{-4} моль/дм³.

Выявленные закономерности поведения радионуклидов рутения могут быть использованы для повышения эффективности способов ионного обмена и мембранного разделения для очистки технологических растворов и жидких радиоактивных отходов, образующихся на ядерных и радиационных объектах. Показано, что сорбция на катионите наиболее эффективна из сильно-кислых растворов, а при рН 6,0–9,0 достигаются наиболее оптимальные условия для формирования псевдоколлоидных частиц, удаляющихся ультрафильтрацией.

Список использованных источников

1. Милютин, В. В. Современные методы переработки жидких радиоактивных отходов : учеб. пособие / В. В. Милютин, Б. Е. Рябчиков, П. В. Козлов. – Озерск : РИЦ ВРБ, 2015. – 126 с.
2. Knope, K. E. Solution and Solid-State Structural Chemistry of Actinide Hydrates and Their Hydrolysis and Condensation Products / K. E. Knope, L. Soderholm // *Chem. Rev.* – 2013. – Vol. 113, N 2. – P. 944–994. <https://doi.org/10.1021/cr300212f>
3. Maher, K. Environmental Speciation of Actinides / K. Maher, J. R. Bargar, G. E. Brown Jr. // *Inorg. Chem.* – 2013. – Vol. 52, N 7. – P. 3510–3532. <https://doi.org/10.1021/ic301686d>
4. Walther, C. Actinide Colloids and Particles of Environmental Concern / C. Walther, M. A. Denecke // *Chem. Rev.* – 2013. – Vol. 113, N 2. – P. 995–1015. <https://doi.org/10.1021/cr300343c>
5. Давыдов, Ю. П. Основы радиохимии : учеб. пособие / Ю. П. Давыдов. – Минск : Высшая школа, 2014. – 317 с.
6. Формы нахождения радионуклида кобальта-60 в растворах борной кислоты / А. М. Зарубо [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 24–32. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>
7. Petrovskiy, A. M. Analytical Ways of Determining the Activity of Fission Products in the Core of a VVER-1200 Reactor and Their Applications / A. M. Petrovskiya, Ed. A. Rudak, T. N. Korbut // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2018. – Vol. 82, N 10. – P. 1335–1341. <https://doi.org/10.3103/s1062873818100179>
8. Mun, C. Review of literature on ruthenium behavior in nuclear power plant severe accidents / C. Mun, L. Cantrel, C. Madić // *Nuclear technology.* – 2006. – Vol. 156, N 3. – P. 332–344. <https://doi.org/10.13182/nt156-332>
9. Neeb, Karl-Heinz The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors / Karl-Heinz Neeb. – Berlin ; New York : de Gruyter, 1997. – 725 p. <https://doi.org/10.1515/9783110812015>
10. Mun, C. Study of the ruthenium fission-product behavior in the containment of a nuclear reactor in case of a severe accident occurring in oxidizing condition [Electronic resource] / C. Mun, L. Cantrel, C. Madić // *International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled.* – 5–8 September 2005. – Mode of access: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/104/37104742.pdf?r=1. – Date of access: 23.06.2021
11. Separation of fission produced ^{106}Ru from simulated high level nuclear wastes for production of brachytherapy sources / M. Blicharska [et al.] // *J Radioanal. Nucl. Chem.* – 2013. – Vol. 298, N 3. – P. 1713–1716. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2570-3>
12. Строительство энергоблоков № 3 и 4 Хмельницкой АЭС. Технично-экономическое обоснование. Т. 13.3. Оценка воздействий на окружающую среду (ОВОС). Общая характеристика энергоблоков [Электронный ресурс] / Государственное предприятие «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» – ОП «Атомпроектинжиниринг». – Режим доступа: umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/energie/kernenergie/verfahren/ukraine/uvp_k3_4/2019/23_07_18_umweltbericht_2016_vol_13/k34_ukrainisch/t_13_3/13.03_3.pdf. – Дата доступа: 10.02.2021.
13. Separation and recovery of ruthenium: a review / P. Swain [et al.] // *J Radiation Nucl Chem.* – 2013. – № 298, N 2. – P. 781 – 796. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2536-5>
14. Неорганическая химия : в 3 т. / редкол.: Ю. Третьяков (гл. ред.) [и др.]. – М.: Академия, 2004. – Т. 3, кн 2 : Химия переходных металлов. – 85 с.
15. Schulz, W. W. Radiochemistry of elements: radiochemistry of ruthenium / W. W. Schulz, S. G. Metcalf, G. S. Barney. – United States, 1984. – 197 p. <https://doi.org/10.2172/6278899>
16. Richards, J. M. Selective Partitioning of Ruthenium from Nitric Acid Media / J. M. Richards, B. J. Mincher // *Solvent Extraction and Ion Exchange.* – 2017. – Vol. 35, N 1. – P. 49–60. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1279923>
17. Rard, J. A. Thermodynamic databases for multivalent elements: an example for ruthenium [Electronic resource] / J. A. Rard // *International Conference of Thermodynamics of Aqueous Systems with Industrial Applications Airlie House, Warrenton, Virginia, 1987.* – Mode of access: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1103533/m2/1/high_res_d/5752074.pdf. – Date of access: 23.06.2021

18. Старик, И. Е. Основы радиохимии / И. Е. Старик. – М.: Наука, 1969. – 648 с.
19. Руководство к практическим занятиям по радиохимии. 2-е изд. перераб. / под ред. Ан. Н. Несмеянова. – М.: Химия, 1980. – 584 с.
20. Charge Effects in the Fractionation of Natural Organics Using Ultrafiltration / Schafer Andrea I. [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2002. – Vol. 36, N 12. – P. 2572–2580. – 2017. – <https://doi.org/10.1021/es0016708>
21. Povar, I. Ruthenium redox equilibria 3. Pourbaix diagrams for the systems Ru-H₂O and Ru-Cl-H₂O / I. Povar, O. Spinu // *J. Electrochem. Sci. Eng.* – 2016. – Vol. 6, N 1. – P. 145–153. <https://doi.org/10.5599/jese.229>
22. Benes, P. Trace chemistry of aqueous solutions. General chemistry and radiochemistry / P. Benes, V. Majer. – Praga: Academia, 1980. – P. 83–88.

References

1. Milytin V. V., Ryabchikov B. E., Kozlov P. V. *Modern methods of processing liquid radioactive waste*. Ozersk, Editorial and publishing center VRB, 2015. 126 p. (in Russian).
2. Knope K. E., Soderholm L. Solution and Solid-State Structural Chemistry of Actinide Hydrates and Their Hydrolysis and Condensation Products. *Chemical Reviews*, 2013, vol. 113, no. 2, pp. 944–994. <https://doi.org/10.1021/cr300212f>
3. Maher K., Bargar J. R., Brown G. E. Jr Environmental Speciation of Actinides. *Inorganic Chemistry*, 2013, vol. 52, no. 7, pp. 3510–3532. <https://doi.org/10.1021/ic301686d>
4. Walther C., Denecke M. A. Actinide Colloids and Particles of Environmental Concern. *Chemical Reviews*, 2013, vol. 113, no. 2, pp. 995–1015. <https://doi.org/10.1021/cr300343c>
5. Davydov Y. P. *Fundamentals of radiochemistry*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2014. 314 p. (in Russian).
6. Zarybo A. M., Radkevich A. V., Korenkova O. B., Voronik N. I. Species of radionuclide cobalt-60 in boric acid solutions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2020, no 1, pp 24–32 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>
7. Petrovskiy A. M. Ed. Rudak A., Korbut T. N. Analytical Ways of Determining the Activity of Fission Products in the Core of a VVER-1200 Reactor and Their Applications. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, no. 10, pp. 1335–1341. <https://doi.org/10.3103/s1062873818100179>
8. Mun C., Cantrel L., Madic C. Review of literature on ruthenium behavior in nuclear power plant severe accidents. *Nuclear technology*, 2006, vol. 156, no. 3, pp. 332–344. <https://doi.org/10.13182/nt156-332>
9. Karl-Heinz Neeb *The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors*. Berlin, New York: de Gruyter, 1997, 725 p. <https://doi.org/10.1515/9783110812015>
10. Mun C., Cantrel L., Madic C. Study of the ruthenium fission-product behavior in the containment of a nuclear reactor in case of a severe accident occurring in oxidizing condition. *International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled. 5–8 September 2005*. Available at https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/104/37104742.pdf?r=1/ (accessed: 23 June 2021).
11. Blicharska M., Bartos B., Krajewski S., Bilewicz A. Separation of fission produced ¹⁰⁶Ru from simulated high level nuclear wastes for production of brachytherapy sources. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, vol. 298, no. 3, pp. 1713–1716. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2570-3>
12. *Construction of power units No. 3 and 4 of Khmel'nitsky NPP. Feasibility study. Volume 13.3. Environmental Impact Assessment (EIA). General characteristics of power units*. Available at: http://mweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/energie/kernenergie/verfahren/ukraine/uvp_k3_4/2019/23_07_18_umweltbericht_2016_vol_13/k34_ukrainisch/t_13_3/13.03_3.pdf (accessed 10 February 2021).
13. Swain P. Separation and recovery of ruthenium: a review. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, no 298, no. 2, pp. 781–796. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2536-5>
14. Tretyakov Y. *Inorganic chemistry. Chemistry of transition metals*. Moscow, Academia Publ., 2004. 368 p. (in Russian).
15. Schulz W. W., Metcalf S. G., Barney G. S. *Radiochemistry of elements: radiochemistry of ruthenium*. United States, 1984. 197 p. <https://doi.org/10.2172/6278899>
16. Richards J. M., Mincher B. J. (2017) Selective Partitioning of Ruthenium from Nitric Acid Media. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2017, vol. 35, no 1, pp. 49–60. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1279923>
17. Rard J. A. Thermodynamic databases for multivalent elements: an example for ruthenium. *International Conference of Thermodynamics of Aqueous Systems with Industrial Applications Airlie House*. Warrenton, Virginia, 1987. Available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1103533/m2/1/high_res_d/5752074.pdf (accessed: 23 June 2021).
18. Staryk I. E. *Fundamentals of radiochemistry*. Moscow, Nayka Publ., 1969. 648 p. (in Russian).
19. Nesmeyanov A. (ed.). *A guide to practical exercises in radiochemistry*. 2nd ed. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 584 p. (in Russian).
20. Schafer Andrea I., Mauch R., Waite T. D., Fane A. G. Charge Effects in the Fractionation of Natural Organics Using Ultrafiltration. *Environmental Science & Technology*, 2002, no. 36, no. 12, pp. 2572–2580. <https://doi.org/10.1021/es0016708>
21. Povar I., Spinu O. Ruthenium redox equilibria 3. Pourbaix diagrams for the systems Ru-H₂O and Ru-Cl-H₂O. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 145–153. <https://doi.org/10.5599/jese.229>
22. Benes P., Majer V. *Trace chemistry of aqueous solutions. General chemistry and radiochemistry*. Praga, Academia, 1980. 88 p.

Информация об авторах

Коренькова Ольга Борисовна – мл. науч. сотрудник. Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: korenkova_olya@mail.ru

Радкевич Артем Валерьянович – ученый секретарь. Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: artem-rav@yandex.by

Вороник Надежда Ивановна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: ireplab06@mail.ru

Information about the authors

Olga B. Korenkova – Junior Researcher. The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: korenkova_olya@mail.ru

Artyom V. Radkevich – Scientific Secretary. The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: artem-rav@yandex.by

Nadezhda I. Voronik – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: ireplab06@mail.ru