

ISSN 1561-8331 (Print)
 ISSN 2524-2342 (Online)
 УДК 544.58+621.039.73
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>

Поступила в редакцию 25.06.2019
 Received 25.06.2019

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

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

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА КОБАЛЬТА-60 В РАСТВОРАХ БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Аннотация. Исследовано состояние радионуклида ^{60}Co в модельных растворах теплоносителя бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива с использованием методов ультрафильтрации и центрифугирования. Показано влияние pH и состава раствора на формы нахождения радионуклида ^{60}Co , установлены границы существования ионных и неионных (псевдоколлоидных) форм. В растворах борной кислоты 20 г/л при pH 4–8 большая часть ^{60}Co находится в ионном состоянии в виде гидратированного катиона Co^{2+} . Размер неионных форм кобальта в данном интервале pH составляет 1–50 нм. Начиная с pH 8 доля неионных форм резко увеличивается и достигает 100 % при pH 10–11, что связано с образованием ионов CoOH^+ и их повышенной сорбционной активностью при образовании псевдоколлоидов. Внесение в раствор ионов железа (III), являющихся предшественниками продуктов коррозии, сдвигает образование неионных форм ^{60}Co в более низкую область pH.

Ключевые слова: состояние радионуклидов в растворе, ^{60}Co , бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива, ультрафильтрация, центрифугирование

Для цитирования. Формы нахождения радионуклида кобальта-60 в растворах борной кислоты / А. М. Зарубо [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 24–32. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>

Alexander M. Zarubo, Artem V. Radkevich, Olga B. Korenkova, Nadzeya I. Voronik

*Science institution «The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny» National Academy of Sciences of Belarus,
 Minsk, Belarus*

COBALT-60 RADIONUCLIDE SPECIATION IN BORIC ACID SOLUTIONS

Abstract. In this work, the speciation of ^{60}Co radionuclide in model solution of spent fuel pool coolant is studied by ultrafiltration and centrifugation. The effect of pH and composition of the solution on the ^{60}Co radionuclide speciation is shown; the limits in existence of ionic and non-ionic (pseudocolloidal) forms are defined. A great part of ^{60}Co states at ionic form represented by hydrated cation of ^{60}Co in the solutions of boric acid 20 g/L at 4–8 pH value. The size of non-ionic forms of ^{60}Co in this pH range is 1–50 nm. Starting with pH 8, the content of non-ionic forms increases dramatically and reaches 100 % at pH value 10–11, which is due to formation of CoOH^+ ions and their increased sorption activity at forming pseudocolloids. Introduction of iron (III) ions to the solution, which are precursors of corrosion products, shifts the formation of non-ionic forms of ^{60}Co to lower pH area.

Keywords: radionuclides speciation in solution, ultrafiltration, centrifugation, ^{60}Co , spent fuel pool

For citation. Zarubo A. M., Radkevich A. V., Korenkova O. B., Voronik N. I. Cobalt-60 radionuclide speciation 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, vol. 56, no. 1, pp. 24–32 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>

Введение. На АЭС с реакторами ВВЭР отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) после выгрузки из активной зоны размещается в специальном приреакторном бассейне выдержки. Мокрое хранение ОЯТ в течение до 10 лет обеспечивает снятие остаточного тепловыделения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и физическую защиту ОЯТ, предотвращает возникновение самоподдерживающейся цепной реакции, защищает персонал от воздействия ионизирующего излучения [1].

Химический состав воды бассейна выдержки строго регламентируется с целью поддержания необходимого уровня подкритичности, обеспечения прозрачности среды для выполнения транспортно-технологических операций с ОЯТ, минимизации скорости коррозии конструкционных материалов ТВС, оборудования и трубопроводов, минимизации накопления шлама на дне бассейна и отложений на поверхности ТВС, минимизации содержания радионуклидов в воде [2]. Требования к водно-химическому режиму бассейна выдержки приведены в таблице [3].

Диагностические показатели качества воды бассейна выдержки для энергоблока проекта АЭС-2006

Diagnostic indicators of water quality of the spent fuel pool for the power unit of the NPP-2006 project

Показатель	Контрольные уровни
Концентрация борной кислоты, г/дм ³	от 16 до 20
Величина рН, не менее	4,2
Концентрация Cl ⁻ , мг/дм ³ , не более	0,1
Концентрация F ⁻ , мг/дм ³ , не более	0,1
Концентрация общего органического углерода, мг/дм ³ , не более	1,0
Прозрачность, %, не менее	95

Вода бассейна выдержки АЭС с ВВЭР имеет сложный радионуклидный состав. Высокая радиоактивность технологической среды бассейна выдержки в процессе эксплуатации обусловлена присутствием более 20 долгоживущих радионуклидов активационного и осколочного происхождения, в том числе ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs [4]. Эти радионуклиды могут переходить в воду бассейна выдержки как из отложений с поверхности ТВС, так и из негерметичных ТВС. При этом многие радионуклиды (особенно гидролизующиеся металл-ионы) присутствуют в растворах в различных формах, что определяется рядом факторов – значением рН, ионной силой, влиянием других присутствующих катионов и анионов, комплексообразователей [5]. Поскольку радионуклиды находятся в растворе, как правило, в следовых концентрациях (<10⁻⁷ М), основной их формой нахождения являются псевдоколлоиды. В псевдоколлоидное состояние радионуклиды переходят в результате сорбции на посторонних частицах, которые всегда присутствуют в растворе, например на продуктах коррозии, коллоидах кремниевой кислоты и т.д.

Для поддержания показателей качества воды бассейна выдержки предназначена отдельная система спецводоочистки (СВО-4), в проектах ЛАЭС-2 и Белорусской АЭС – это система очистки воды топливного бассейна и баков хранения борированной воды.

В проектах АЭС с реакторами ВВЭР-1000 система очистки бассейна выдержки включает одну или две технологические нитки насыпных ионитных фильтров (НИФ). Технологический процесс очистки происходит последовательно на механическом ионитном, катионитном и анионитном фильтрах [2]. При этом насыпные механические фильтры, несмотря на простоту и надежность, характеризуются низкой эффективностью очистки от механических и коллоидных примесей, обеспечения прозрачности воды.

С учетом того что основные дозообразующие радионуклиды в условиях бассейна выдержки образуют преимущественно неионные формы, для эффективного их извлечения, а также удаления продуктов коррозии актуальной задачей является использование новых технологических решений. Одним из таких решений является внедрение в проекте АЭС-2006 намывных ионитных фильтров (НИФ) [6], а также возможное применение мембранных технологий [7].

Для поддержания норм водно-химического режима, воды бассейна выдержки и баков хранения борированной воды на Белорусской АЭС предусматриваются две стадии очистки: НИФ и фильтры смешанного действия (ФСД). Функцией НИФ является удаление радиоактивных продуктов коррозии, находящихся в дисперсной форме, и очистка от взвешенных загрязнений. Использование НИФ в качестве механических фильтров системы очистки воды топливного бассейна и баков хранения борированной воды является отличием рассматриваемого проекта от проекта с реактором ВВЭР-1000.

Необходимо отметить, что рассмотрение новых перспективных методов очистки воды бассейна выдержки должно опираться на информацию о формах нахождения радионуклидов в изучаемой среде. Возможность образования радионуклидами различных ионных и неионных форм будет определять применение новых технологических решений для их наиболее эффективного извлечения из раствора.

В данной работе представлены результаты исследования форм нахождения ⁶⁰Co, как одного из основных дозообразующих радионуклидов [8], в растворах борной кислоты, моделирующих среду бассейна выдержки, а также сравнение с его состоянием в дистиллированной воде и в растворе электролита KNO₃.

Экспериментальная часть. Состояние ^{60}Co в растворах моделирующих среду бассейна выдержки АЭС с ВВЭР исследовали методами ультрафильтрации и центрифугирования. Исследования проводили в следующих исходных растворах: раствор H_3BO_3 с концентрацией 20 г/дм^3 , а в качестве реперных растворов использовали $0,1 \text{ моль/дм}^3 \text{ KNO}_3$ и дистиллированную воду. В работе применяли реактивы качества х. ч., кроме борной кислоты – ч.д.а.

Изучение влияния форм железа, моделирующих продукты коррозии, на поведение радионуклидов проводили добавлением в раствор Fe(III) . Исходные растворы борной кислоты и нитрата калия приготавливали растворением навески веществ в свежеперегнанной дистиллированной воде. Рабочие растворы борной кислоты, нитрата калия готовили методом разбавления свежеперегнанной дистиллированной водой исходных растворов с концентрацией 40 г/дм^3 и 1 моль/дм^3 соответственно.

Исходный раствор железа концентрацией $2,25 \text{ г/дм}^3$ готовили растворением навески $\text{Fe(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в $0,1 \text{ М HNO}_3$ с нагревом до кипения для гарантированного разрушения полиядерных форм и последующим охлаждением. Концентрацию Fe(III) в исходном растворе контролировали методом спектрофотометрии с сульфосалициловой кислотой и было показано, что железо находится в растворе в форме гидратированного катиона Fe^{3+} .

В рабочие растворы вносили радионуклид в виде раствора $^{60}\text{CoCl}_2$ с изотопным носителем в таком количестве, чтобы активность раствора составляла $\sim 100 \text{ кБк/дм}^3$, при этом концентрация элемента кобальта была $8 \cdot 10^{-7} \text{ моль/дм}^3$. Затем в растворы вносили раствор Fe(III) до общей концентрации железа в растворе 1 мг/дм^3 и значение pH корректировалось растворами HNO_3 или KOH . Растворы термостатировались в течение суток при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эксперименты по ультрафильтрации проводили в ячейке Millipore 8200 с мембраной из регенерированной целлюлозы Millipore Ultracel 1 kDa при давлении 3 бар. Предел отсека мембраны 1 kDa ориентировочно соответствует размеру пор 1 нм и обеспечивает полное задержание коллоидных и псевдоколлоидных частиц.

Центрифугирование растворов проводили с использованием лабораторной центрифуги ОПн-8 на скорости 8000 об./мин в течение 30 мин. Удельную активность радионуклида ^{60}Co в пробах определяли на γ, β -спектрометре МКС 1315; концентрацию борной кислоты – методом потенциометрического титрования с добавлением *D*-маннитола [9]; концентрацию общего железа – спектрофотометрически с сульфосалициловой кислотой [10].

Задержание борной кислоты при ультрафильтрации рассчитывали по формуле:

$$R_{ba} = \frac{C_n}{C_0} 100, \quad (1.1)$$

где R_{ba} – задержание борной кислоты, %; C_n – концентрация H_3BO_3 в пробе n , г/дм^3 , C_0 – концентрация раствора H_3BO_3 , находящегося в ультрафильтрационной ячейке, г/дм^3 .

Задержание ^{60}Co мембраной и осаждение при центрифугировании рассчитывали по формуле:

$$R_{\text{Co}} = \frac{A_n}{A_0} 100, \quad (1.2)$$

где R_{Co} – задержание (осаждение) ^{60}Co , %; A_n – активность ^{60}Co в пробе n , Бк; A_0 – активность ^{60}Co находящегося в ультрафильтрационной ячейке, Бк.

Результаты, представленные в данной работе, являются средними величинами 6–12 опытов. Для оценки истинного значения измеряемой величины использовалось распределение Стьюдента [11]. Ошибки рассчитывались в виде стандартного отклонения с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты и их обсуждение. Предварительно было определено задержание борной кислоты на выбранной мембране. Известно, что при низких концентрациях ($< 0,025 \text{ М}$) борная кислота в растворе образует только моноядерные формы B(OH)_3 и B(OH)_4^- . Однако при более высоких концентрациях в диапазоне pH 6–9 в растворе существуют полибораты [13,14], которые потенциально могут задерживаться мембраной с пределом отсека 1 kDa.

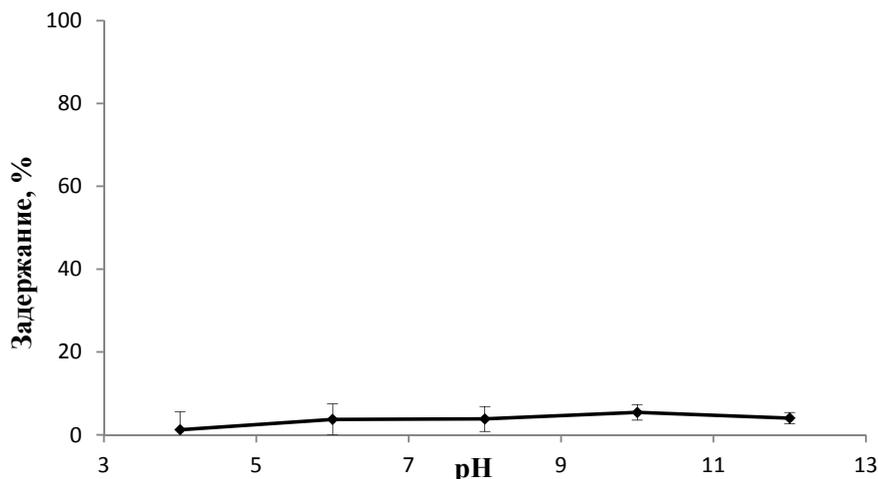


Рис. 1. Задержание борной кислоты при ультрафильтрации

Fig. 1. Boric acid retention by ultrafiltration membrane

На рис. 1 изображена зависимость задержания ультрафильтрационной мембраной раствора борной кислоты с концентрацией 20 г/дм^3 в зависимости от рН.

Полученные данные показывают, что задержание борной кислоты при ультрафильтрации незначительно и сопоставимо с погрешностью эксперимента. При заданных условиях (концентрации 20 г/дм^3 , рН 4–12) борная кислота не образует сравнительно крупных комплексов и коллоидных частиц.

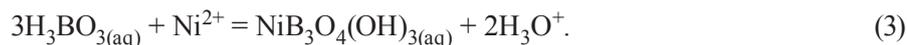
Состояние радионуклида ^{60}Co в растворах изучали в интервале рН 4–11. Диапазон значений рН исследуемых растворов выбирался, исходя из показателей водно-химического режима бассейна выдержки [3]. На рис. 2 представлены зависимости задержания ^{60}Co на мембране и осаждения при центрифугировании от значения рН изучаемого раствора в отсутствие продуктов коррозии (соединений Fe(III)).

Величина задержания при ультрафильтрации ^{60}Co сильно зависит от состава раствора и величины рН, при этом существенных отличий в осаждении при центрифугировании не наблюдается.

В растворе борной кислоты при рН 4–6 наблюдается увеличение задержания ^{60}Co , а в нейтральной области незначительное снижение и выход на постоянное значение до рН 10. Величина задержания составляет 15–40 %, что больше, чем для растворов нитрата калия (5–10 %), но меньше, чем для дистиллированной воды – 40–70 %. С учетом того что кобальт в растворе находится при микроконцентрациях $<10^{-6} \text{ моль/дм}^3$ и вплоть до рН 9, ион Co^{2+} не гидролизует, его задержание связано с образованием псевдоколлоидов за счет сорбиции на примесях загрязнителей, всегда находящихся в растворе. Повышение ионной силы при переходе от дистиллированной воды к растворам борной кислоты и нитрата калия подавляет образование псевдоколлоидов и соответственно уменьшается задержание ^{60}Co на мембране, что согласуется с данными других работ [15].

Одновременно в слабокислой и нейтральной области рН не наблюдается заметного осаждения при центрифугировании во всех изучаемых растворах. Данные результаты указывают, что псевдоколлоидные частицы кобальта имеют размеры от 1 и до 50 нм [16]. На задержание ^{60}Co также может влиять знак и величина заряда поверхности мембраны, так как заряженные частицы могут взаимодействовать с поверхностью мембраны. Если мембрана и частицы имеют одинаковый знак заряда, то происходит отталкивание частиц и увеличивается задержание на мембране (эффект Доннана) [17]. Но в растворе с высоким солевым фоном данный эффект нивелируется из-за проникновения ионов в диффузионный слой мембраны [18].

Снижение задержания ^{60}Co на мембране в нейтральной области рН, вероятно, зависит от нескольких факторов. Согласно работе [19], в растворе борной кислоты высокой концентрации при рН от 6 до 10 в значительных количествах находится триборат-ион $\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3^{2-}$, который может образовывать комплекс с Ni:



С учетом того что элементы кобальт и никель по химическим свойствам схожи [12], то вполне возможно образование триборатного комплекса с ионом кобальта. Формируемый комплекс снижает количество иона кобальта в растворе, таким образом, уменьшая количество иона кобальта адсорбированного на примесях в растворе и уменьшается задержание на мембране ^{60}Co .

Так как мембрана при изменении pH раствора меняет заряд своей поверхности, то при некотором pH возможно нивелирование заряда поверхности мембраны (pH_{pzc}). Следовательно, возможное уменьшение задержания в нейтральной области pH в почти всех исследуемых растворах зависит от достижения pH_{pzc} [18].

При значениях $\text{pH} > 9-10$ во всех растворах наблюдается резкое увеличение задержания при ультрафильтрации и осаждения при центрифугировании, которое достигает 100 % при pH 11.

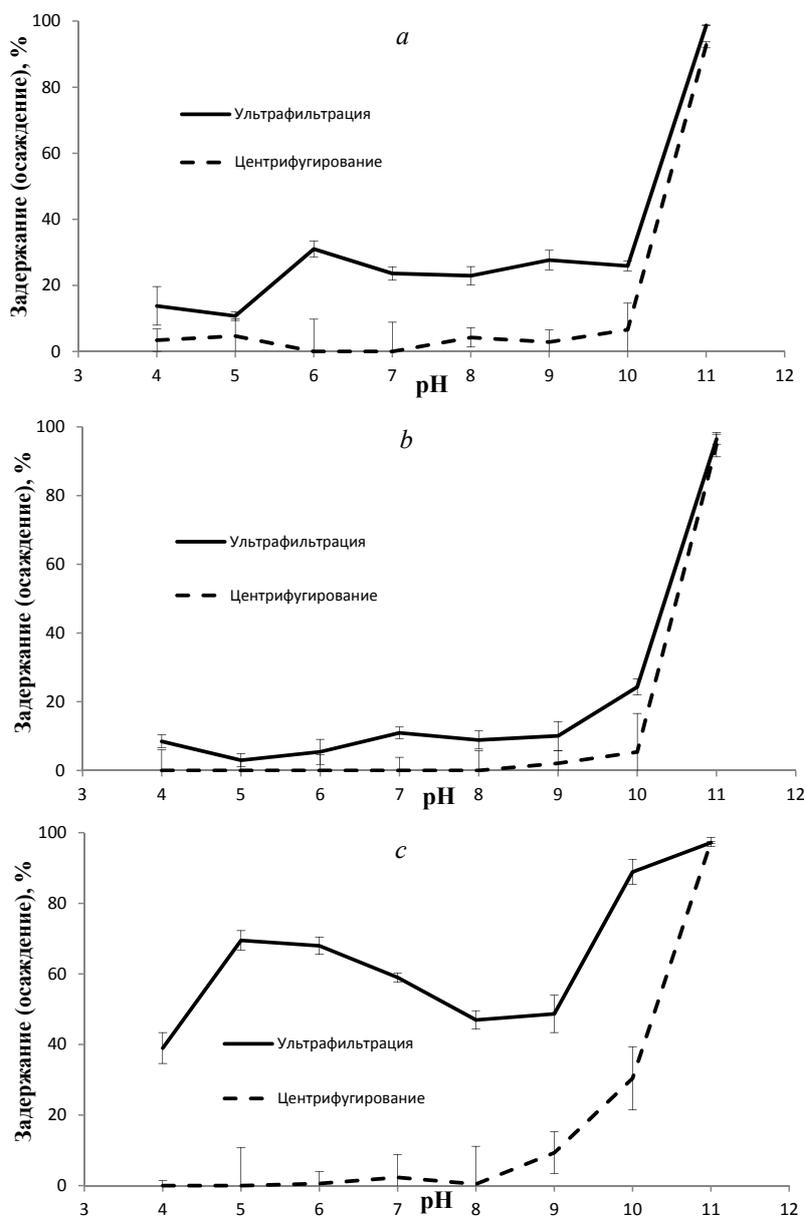


Рис. 2. Задержание (осаждение) ^{60}Co в зависимости от значения pH: *a* – раствор борной кислоты 20 г/дм³, *b* – раствор нитрата калия 0,1 моль/дм³, *c* – дистиллированная вода

Fig. 2. ^{60}Co retention (sedimentation) at different pH values: *a* – boric acid solution 20g/dm³, *b* – potassium nitrate solution 0.1 mol/dm³, *c* – distilled water

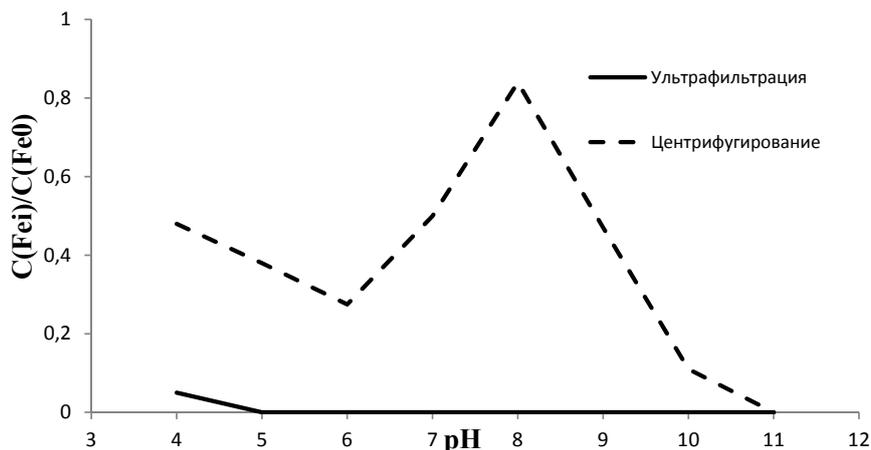


Рис. 3. Задержание железа в растворе борной кислоты в зависимости от значения pH раствора

Fig. 3. Retention of iron in boric acid solution versus pH value

Это, вероятно, связано с образованием гидролизованных форм кобальта в растворе, которые значительно лучше адсорбируются на частицах примесей по сравнению с гидратированным катионом и практически весь кобальт в растворах переходит в псевдоколлоидные формы [20, 21]. Небольшие различия в значениях задержания и осаждения объясняются тем, что в условиях эксперимента при ультрафильтрации ожидается задержание частиц с размером более 1 нм, в то время как при центрифугировании осаждаются частицы более 50 нм. При достижении pH 11 практически весь ^{60}Co присутствует в растворе в неионной форме в виде частиц размером > 50 нм. При внесении в раствор ионов железа, которые являются первичными продуктами коррозии [22], задержание радионуклида кобальта изменяется (рис. 4). Необходимо отметить, что гидролиз железа(III) начинается при $\text{pH} > 2,5$, и задержание на мембране железа достигает почти 100 % уже при pH 4 (рис. 3).

Общей особенностью для всех исследуемых растворов в присутствии железа является сдвиг задержания радионуклида кобальта в область более низких значений pH. При pH 4–8 в растворе борной кислоты поведение ^{60}Co аналогично как в растворах с железом, так и без него. С учетом того что железо(III) за счет гидролиза образует полиядерные формы, можно сделать вывод, что сорбция Co^{2+} на таких формах железа в условиях эксперимента незначительна.

В интервале pH 8–11 задержание ^{60}Co увеличивается с внесением железа, что может быть связано с дополнительной сорбцией первых гидролизных форм кобальта CoOH^+ на продуктах гидролиза Fe(III). Наиболее вероятно, что уменьшается стабильность гидратированных частиц кобальта из-за изменений гидратной оболочки, повышается склонность к сорбции [23].

Заключение. Показаны границы существования ионных и неионных форм ^{60}Co в растворах борной кислоты, моделирующих среду бассейна выдержки ОЯТ ВВЭР, а также проведено сравнение с реперными растворами – дистиллированной водой и раствором нитрата калия. Установлено существенное влияние состава раствора и pH на поведение радионуклида при ультрафильтрации и центрифугировании. В растворах борной кислоты при pH 4–10 большая часть ^{60}Co находится в ионном состоянии в виде гидратированного катиона Co^{2+} , а начиная с pH 8, увеличивается содержание гидроксокомплекса CoOH^+ . При этом доля неионных форм кобальта (псевдоколлоидов, которые образуются вследствие сорбции микроколичеств радионуклида на примесных частицах), задерживаемых мембраной, составляет 15–40 %. В растворах сравнения доля неионных форм кобальта выше в дистиллированной воде (40–70 %), а в растворе нитрата калия ниже – 5–10 %, что, по-видимому, связано с изменением ионной силы раствора и ее влиянием на возможность образования псевдоколлоидов. Размер псевдоколлоидов составляет от 1 до 50 нм. При $\text{pH} > 10$ поведение ^{60}Co в первую очередь определяется гидролизом, образуются относительно крупные псевдоколлоидные частицы размером > 50 нм. В присутствии моделирующих продукты коррозии соединений железа(III) в растворах, несмотря на образование гидролизован-

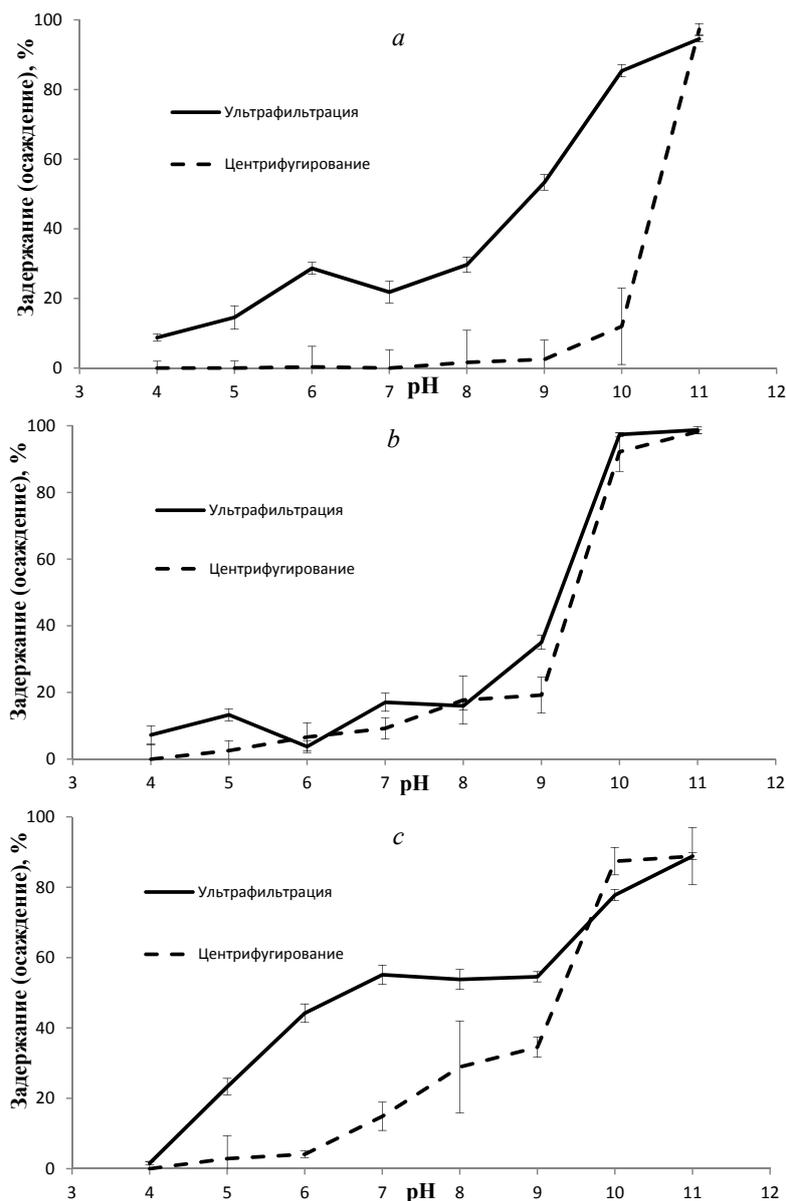


Рис. 4. Задержание ^{60}Co в зависимости от значения pH в присутствии прекурсоров коррозии, где *a* – раствор борной кислоты 20 г/дм^3 , *b* – раствор нитрата калия $0,1\text{ моль/дм}^3$, *c* – дистиллированная вода

Fig. 4. ^{60}Co retention versus pH value in the presence of corrosion precursors, where *a* – boric acid solution 20 g/dm^3 , *b* – potassium nitrate solution 0.1 mol/dm^3 , *c* – distilled water

ных форм Fe(III), задержание и осаждение ^{60}Co в интервале pH 4–8 существенно не изменяется. При увеличении pH > 8 сорбция радионуклида на гидролизированных формах железа существенно возрастает, по-видимому, за счет взаимодействия с CoOH^+ . Повышение сорбционной активности моноядерных гидроксокомплексов по сравнению с гидратированным катионом при образовании псевдоколлоидных частиц отмечалось в других работах [23] и, возможно, связано с образованием смешанных полиядерных гидроксокомплексов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси (грант на выполнение научно-исследовательской работы докторантами, аспирантами и соискателями НАН Беларуси, договор № 2017-26-008 от 03.04.2017).

Acknowledgements. This work has been performed with the financial support of the National Academy of Sciences of Belarus (grant for scientific research by doctoral students, postgraduates and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus, agreement No. 2017-26-008 of 03/04/2017).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Decommissioning of pools in nuclear facilities NES No. NW-T-2.6. – Vienna : IAEA, 2015. – 200 p.
2. Воронов, В. Н. Химико-технологические режимы АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами / В. Н. Воронов, Б. М. Ларин, В. А. Сенина. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 390 с.
3. Водно-химический режим первого контура при вводе энергоблока атомной электростанции проекта АЭС-2006 в эксплуатацию. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения (Изм.2.) : СТО 1.1.1.03.004.0980-2014. – Введено 01.02.2015. – М.: Концерн Росэнергоатом, 2014. – 46 с.
4. Рябчиков, Б. Е. Очистка жидких радиоактивных отходов / Б. Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 468 с.
5. Application of ion exchange processes for the treatment of radioactive waste and management of spent ion exchange. TRS No. 408. – Vienna : IAEA, 2002. – 115 p.
6. Внедрение намывной ионообменной фильтрации в установках спецводоочисток на действующих АЭС с РБМК-1000 / В. Ф. Тяпков [и др.] // Теплоэнергетика. – 2005. – № 7. – С. 36–41.
7. Application of membrane technologies for liquid radioactive waste processing. TRS No. 431. – Vienna : IAEA, 2004. – 156 p.
8. Водно-химический режим АЭС: реферативный обзор / Комплексное техническое бюро, отдел оборудования и научно-технической информации ; науч. ред. В. П. Брусаков. – Москва, 1984. – Вып. 6: Продукты коррозии в первом контуре реакторных систем. – 74 с.
9. Реагенты. Борная кислота : ГОСТ 9656 – 75. – Введ. 01.01.1977. – М.: Стандартиформ, 2008. – 9 с.
10. Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа : ГОСТ 4011 – 72. – Введено 01.01.74. – М.: Стандартиформ, 2008. – 8 с.
11. Скуг, Д. Основы аналитической химии: в 2 т. / Д. Скуг, Д. Уэст. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 480 с.
12. Гринвуд, Н. Н. Химия элементов: в 2 т. / Н. Н. Гринвуд, А. Эрншо. – М.: БИНОМ, 2008. – Т. 1. – 608 с.
13. Kabay, N. Boron Separation Process / N. Kabay, M. Bryjak, N. Hilal. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – 412 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09863-5>
14. Power, P. P. The chemistry of boron and its speciation in plants / P. P. Power, W. G. Woods // Plant and Soil. – 1997. – Vol. 193. – P. 1–13.
15. Selective removal of cobalt species using nanofiltration membranes / K. Choo [et al.] // Environmental science and technology. – 2002. – Vol. 36. – P. 1330–1336. <https://doi.org/10.1021/es010724q>
16. Benes, P. Trace chemistry of aqueous solutions. General chemistry and radiochemistry / P. Benes, V. Majer. – Praga, Academia, 1980. – P. 83–88.
17. Role of charge (Donnan) exclusion in removal of arsenic from water by negatively charged porous nanofiltration membrane / A. Siedel [et al.] // Environmental engineering science. – 2001. – Vol. 18. – P. 105–113. <https://doi.org/10.1089/10928750151132311>
18. Surface charge characterization of nanofiltration membranes by potentiometric titrations and electrophoresis: functionality vs. zeta potential / H. Rho [et al.] // Desalination. – 2018. – Vol. 427. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.003>
19. Complexation of nickel ions by boric acid or (poly)borates / A. Graff [et al.] // Journal of Solution Chemistry. – 2017. – Vol. 46. – P. 25–43. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0555-x>
20. Давыдов, Ю. П. Основы радиохимии / Ю. П. Давыдов. – Минск : Выцэйшая школа, 2014. – 317 с.
21. Cobalt Speciation in Aqueous Solution and Sorbents on the Basis of Natural Dolomite for Cobalt Removal / A. I. Ivanets [et al.] // Cobalt: occurrence, uses and properties / Y. Kobayashi, H. Suzuki. – New York, Nova science publisher, Inc. 2013. – P. 191–214.
22. Химические проблемы атомной энергетики: в 3 т. / Л. Н. Москвин [и др.]. – Санкт-Петербург: BBM, 2016. – Т. 3: Коррозионные процессы в контурах ЯЭУ. – 238 с.
23. Formation of a heteronuclear hydrolysis complex in the Th^{IV}-Fe^{III} system / N. Torapava [et al.] // Dalton Transactions. – 2012. – Vol. 41. – P. 4451–4459. <https://doi.org/10.1039/c2dt30058c>

References

1. Decommissioning of pools in nuclear facilities NES No. NW-T-2.6. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015. 200 p.
2. Voronov V. N. *Chemical-engineering mode of NPP with water-water power reactors*. Moscow, MEI Publ., 2006. 390 p. (in Russian).
3. СТО 1.1.1.03.004.0980-2014. *Water chemistry of primary circuit for nuclear power plant unit commissioning NPP-2006. Coolant quality standard and resources of their provision. (Rev. 2)*. Moscow, Concern Rosenergoatom, 2014. 46 p. (in Russian).
4. Ryabchikov B. E. *Treatment of liquid radioactive waste*. Moscow, DeLi print Publ., 2008. 468 p. (in Russian).
5. *Application of ion exchange processes for the treatment of radioactive waste and management of spent ion exchange. Technical Reports Series no. 408*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2002. 115 p.
6. Тяпков В. Ф. Implementation of powdered resin polishing in active water treatment plant at be in operation NPP with RBMK-1000. *Teploenergetika = Heat power engineering*, 2005, no. 7, pp. 36–41 (in Russian).
7. *Application of membrane technologies for liquid radioactive waste processing. Technical Reports Series no. 431*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2004. 156 p.

8. Brusakov V. P. (ed.). *Water chemistry of NPP. Issue 6. Corrosion products in primary circuit of reactor systems*. Review. Moscow, 1984. 74 p. (in Russian).
9. State Standard 9656 – 75. *Reagents. Boric acid*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 9 p. (in Russian).
10. State Standard 4011 – 72. *Drinking water. Determination method of total iron mass fraction*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 p. (in Russian).
11. Skoog D. A., West D. M. *Fundamentals of analytical chemistry*. NY, Harper and Pow, Publishers, 1963. 964 p.
12. Greenwood N. N., Earnshaw A. *Chemistry of Elements*. Elsevier Ltd., 1984. 486 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-03718-8>
13. Kabay N., Bryjak M., Hilal N. *Boron Separation Process*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 412 p. Kabay N., Bryjak M., Hilal N. *Boron Separation Process*
14. Power P. P., Woods W.G. The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and Soil*, 1997, vol. 193, pp. 1–13.
15. Kwang-Ho Choo, Dae-Joong Kwon, Kwang-Won Lee, Sang-June Choi. Selective removal of cobalt species using nanofiltration membranes. *Environmental science and technology*, 2002, vol. 36, pp. 1330–1336. <https://doi.org/10.1021/es010724q>
16. Benes P., Majer V. *Trace chemistry of aqueous solutions. General chemistry and radiochemistry*. Praga, Academia, 1980, pp. 83–88.
17. Seidel A., Waypa J. J., Elimelech M. Role of charge (Donnan) exclusion in removal of arsenic from water by negatively charged porous nanofiltration membrane. *Environmental engineering science*, 2001, vol. 18, pp. 105–113. <https://doi.org/10.1089/10928750151132311>
18. Rho H., Chon K., Cho J. Surface charge characterization of nanofiltration membranes by potentiometric titrations and electrophoresis: functionality vs. zeta potential. *Desalination*, 2018, vol. 427, pp. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.003>
19. Graff A., Barrez E., Baranek P., Bachet M., Bénézeth P. Complexation of nickel ions by boric acid or (poly)borates. *Journal of Solution Chemistry*, 2017, vol. 46, pp. 25–43. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0555-x>
20. Davydov Y. P. *Basics of radiochemistry*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2014. 317 p.
21. Ivanets A. I., Shashkova I. L., Davydov D. Y., Torapava V. V., Radkevich A. V. Cobalt Speciation in Aqueous Solution and Sorbents on the Basis of Natural Dolomite for Cobalt Removal. *Cobalt: occurrence, uses and properties*. New York, Nova science publisher, Inc. 2013, vol. 191, pp. 191–214.
22. Moskvina L. N., Efimov A. A., Pykhteev O. Yu., Gusev B. A. *Chemical problems in nuclear power industry. Vol. 3 Corrosion processes in circuits of PRF*. Saint-Petersburg, VVM, 2016. 238 p. (in Russian).
23. Torapava N., Radkevich A., Persson I., Davydov D., Eriksson L. Formation of a heteronuclear hydrolysis complex in the Th^{IV}-Fe^{III} system. *Dalton Transactions*, 2012, vol. 41, no. 15, pp. 4451–4459. <https://doi.org/10.1039/c2dt30058c>

Информация об авторах

Зарубо Александр Михайлович – науч. сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Национальная академия наук Беларуси (223063, д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: aliaksandr.zaruba@sosny.bas-net.by

Радкевич Артем Валерьянович – науч. сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Национальная академия наук Беларуси (223063, д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by

Коренькова Ольга Борисовна – мл. науч. сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Национальная академия наук Беларуси (223063, д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: korenkova@sosny.bas-net.by

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

Information about the authors

Alexander M. Zarubo – Researcher. The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: aliaksandr.zaruba@sosny.bas-net.by

Artem V. Radkevich – Researcher. The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by

Olga B. Korenkova – Junior Researcher. The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: korenkova@sosny.bas-net.by

Nadzey I. Voronic – Leading Researcher. The Joint Institute of Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus (47/22, Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: ireplab06@mail.ru