УДК 621.039.73
DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.06
Оригинальная статья / Original paper

# Интеграция нормативно-правовых требований и научно-технических принципов в разработке систем очистки трапных вод АЭС с ВВЭР

**А.С. Чугунов, В.А. Винницкий**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),*
*190013 Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26*

**Реферат.** Рассматриваются особенности эксплуатации АЭС в контексте обращения с жидкими радиоактивными средами. Подчеркивается, что традиционные технологии очистки и компактного хранения таких сред, основанные на принципе нулевого выхода радиоактивных веществ за пределы территории АЭС, становятся морально устаревшими и экономически неэффективными в условиях действия новых нормативно-правовых актов (ФЗ № 89 и ФЗ № 190). Проанализирована опытная эксплуатация новой системы очистки трапных вод на блоках № 1 и 2 НВЭАС-2, выявлены причины неполного достижения проектных показателей и представлено комплексное научно-техническое обоснование применения метода ионоселективной сорбции. Описаны условия образования катионных, анионных и нейтральных комплексов при участии лигандов ($OH^-$, оксалат-, фосфат-анионов и др.) и влияние pH среды на долю сорбционно-активных форм радионуклидов ($^{7}Be$, $^{60}Co$, $^{124,125}Sb$). В качестве перспективного направления предложена сортировка радионуклидов по периоду полураспада с использованием мембранной нанофильтрации, удерживающей в ретентате крупноразмерные ионы с малой подвижностью – комплексоны и комплексонаты и другие комплексные формы активированных продуктов коррозии и, вероятно, полимерные формы сурьмы, выводя при этом в пермеат ионы щелочных металлов и аммония. Обоснована необходимость комплексного учета нормативно-правовых и естественно-научных факторов при проектировании современных систем очистки трапных вод АЭС.

**Ключевые слова:** нормативно-правовое регулирование, отходы АЭС, экологическая безопасность, трапные воды, система спецводоочистки.

**Для цитирования:** Чугунов А.С., Винницкий В.А. Интеграция нормативно-правовых требований и научно-технических принципов в разработке систем очистки трапных вод АЭС с ВВЭР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;4:80–95. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.06

© *Чугунов А.С., Винницкий В.А., 2025*

## Введение

Продолжая ранее начатое обсуждение [1, 2], отметим, что внедрение технологических решений без надлежащего научно-технического обоснования в сфере ядерной энергетики способно существенно скорректировать или даже нарушить действующие планы ее развития.

Проектирование объектов промышленного назначения осуществляется в строгом соответствии с действующим законодательством Российской Федерации и вытекающими из него отраслевыми нормативно-правовыми актами, соблюдение требований которых подтверждается экспертизой, проводимой уполномоченными надзорными органами.

При этом необходимо учитывать длительность срока эксплуатации объектов использования атомной энергии, которая превышает несколько десятилетий. В течение этого периода могут устареть материалы и технические решения, примененные на этапе проектирования, вплоть до их снятия с производства вследствие утраты массового спроса. Параллельно с этим вероятность изменений нормативно-правовой базы, определяющей режимы эксплуатации предприятий атомной отрасли, остается высокой. История развития атомной энергетики демонстрирует наглядные примеры подобных трансформаций.

Так проектный ресурс действующих АЭС установлен на уровне 50-ти лет, тогда как для вновь возводимых энергоблоков по результатам технического освидетельствования он уже доведен до 60-ти лет [3 – 5].

## Эволюция принципов обращения с жидкими радиоактивными средами на АЭС

Действовавший до 2011 г. принцип «нулевого выхода» радиоактивных веществ за периметр АЭС предполагал размещение всех образующихся радиоактивных стоков в собственных хранилищах радиоактивных отходов (РАО). Их проектный объем должен был обеспечивать прием жидких радиоактивных сред в течение всего срока эксплуатации станции. Для обеспечения долговременной безопасности предусматривалось оснащение каждой АЭС установками для перевода всех компонентов жидких радиоактивных сред, образующихся в процессе эксплуатации, в безопасную для долговременного хранения на территории АЭС форму, превращая, по сути, ранее действующие промплощадки в места для долговременной (не менее 300 лет) изоляции радиоактивных отходов. При этом прежние производственные площадки фактически трансформировались бы в хранилища радиоактивных отходов, что требовало бы соответствующей правовой фиксации нового статуса объектов.

Однако уже к концу XX в. стало очевидным, что при реализации данного принципа наблюдается сверхнормативный темп заполнения емкостей для временного хранения кубового остатка [6, 7]. В случае АЭС с РБМК-1000 опорожнение этих емкостей было отложено до этапа вывода станции из эксплуатации, тогда как для действующих энергоблоков ВВЭР задача сокращения темпа заполнения емкостей для приема кубовых остатков остается критически важной.

Для поддержания свободного маневренного объема емкостей временного хранения жидких радиоактивных отходов (ЖРО), заполненных преимущественно кристаллическими солями [6, 8 – 10], была разработана технология их опорожнения, конечная фаза которой представляет собой глубокое обезвоживание концентрата солей, завершающееся образованием так называемого «солевого плава» [11]. Полученный продукт фасуют и направляют в хранилища твердых радиоактивных отходов, что приводит к быстрому уменьшению их свободной емкости.

В качестве следующего шага в решении этой задачи было предложено применять сорбенты на основе гексацианоферроатов для селективного удаления дозообразующих радионуклидов $^{134,137}Cs$ из радиоактивных концентратов [12, 13]. Это позволило радикально снизить удельную активность образующегося солевого плава и, соответственно, упростить условия его хранения. Дальнейшее развитие этой технологии, получившее озвученное в 1996 г. наименование «ионоселективная сорбция радионуклидов» [14, 15], позволило довести удельную активность солевых плавов до уровня очень низкоактивных отходов. Концентрирование основной массы радионуклидов в относительно небольшом объеме сорбентов, размещаемых в хранилищах ТРО и солевой составляющей, крайне низкая активность которой уже допускает возможность ее размещения в легко возводимых на площадках АЭС хранилищах ангарного типа. Тем самым снимается острота проблемы маневровых объемов для размещения концентратов трапных вод.

## Нормативно-правовые предпосылки модернизации систем очистки

Введение в действие Федеральных законов от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»[1] и от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами…»[2] способно кардинально изменить существующую практику обращения с жидкими радиоактивными средами АЭС и стимулировать дальнейшее совершенствование технологий их переработки.

Допустим, что технология ионоселективной сорбции будет доведена до получения солевой составляющей, удельная активность которой не превысит нормативно закрепленных контрольных уровней для условно чистых солей. Первым следствием этого достижения будет увеличение совокупного объема радиоактивных и химических отходов и, как следствие, отчуждение площадей под склады для размещения накапливающихся химических отходов.

Появление на площадке АЭС неутилизированных химических веществ влечет за собой применение положений Федерального закона № 89-ФЗ в части признания АЭС предприятием, генерирующим общепромышленные отходы. Это в свою очередь обязывает получить лицензию на обращение с данными веществами, соблюдать установленные сроки их временного хранения на отведенной территории и обеспечивать последующее перемещение на специализированные полигоны с возмещением возможного экологического ущерба.

[1] Федеральный закон от 24 июня 1998 г. №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»

[2] Федеральный закон от 11 июля 2011 г. №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

В качестве одного из вариантов устранения этой проблемы можно рассмотреть выдачу разрешения на создание собственного полигона для размещения химических отходов. Однако реализация данного решения сопряжена с проведением дорогостоящих мероприятий, регламентированных действующими нормативно-правовыми актами. В противном случае договоренности о размещении отходов придется заключать с владельцами существующих полигонов, что неизбежно увеличит затраты.

Это вызывает естественный для хозяйствующего субъекта вопрос о логистической и экономической состоятельности идеологии фракционирования компонентов радиоактивно загрязненных растворов. Неразрешенность сопутствующих организационно-правовых и инфраструктурных вопросов на этапе проектирования может в долгосрочной перспективе привести к ситуации, когда решение одной задачи приведет к созданию целого ряда других трудноразрешимых проблем.

Следует подчеркнуть, что эти аспекты, выходящие за рамки химической технологии как таковой, способны значительно влиять на выбор технических решений в разрабатываемых проектах. Особенно это актуально в тех случаях, когда суммарные затраты на удаление образующихся отходов в места изоляции будут превышать расходы на изготовление и эксплуатацию системы фракционирования компонентов жидких радиоактивных сред, в которой может быть задействован достаточный набор современных средств обеспечения технологического процесса.

## Концептуальные основы ионоселективной сорбции

Циклы проектирования, строительства и эксплуатации АЭС достаточно продолжительны, что приводит к высокой вероятности корректировки действующей нормативно-правовой базы, как правило, в сторону ужесточения требований. В таких условиях качество технических решений в области экологической безопасности проявляется лишь через достаточно длительное время, оптимально – если только на стадии проведения пуско-наладочных работ.

Следовательно, уже на стадии проектирования АЭС необходимо, чтобы принимаемые проектные решения изжили недоработки предыдущих проектов и обеспечили возможность модернизационной гибкости ключевых неэнергетических подсистем, прежде всего – хим- и спецводоочисток в части сокращения потребления как ионообменных материалов, так и реагентов, используемых для их регенерации.

Следует отметить, что в новых проектах АЭС, разрабатываемых в рамках концепции ВВЭР-ТОИ (в частности, на строящейся Курской АЭС – 2), размещение кубовых остатков в ХЖО изначально не предусмотрено [16, 17].

В этой связи вызывает серьезные опасения, что принятие в качестве прототипа системы так называемой «ионоселективной очистки» [18 – 20], включающей в себя морально устаревшие еще в последней четверти XX в. системы сбора потенциально загрязненных радионуклидами вод и методы удаления из них активированных продуктов коррозии сорбцией на оксигидратах железа (III) [21], станет на долгие годы узаконенной.

С точки зрения логистики минимизация затрат на транспортировку и размещение радиоактивных отходов возможна лишь при достижении в процессе переработки верхних значений критериев приемлемости ТРО для «вечной» изоляции. Однако

предлагаемые к использованию технологии в принципе не способны обеспечить этот уровень из-за образования чрезмерно большого количества твердых радиоактивных отходов [20].

В данном контексте идеология ионоселективной сорбции в ее истинном понимании, применяемом в гидрометаллургии, в значительно большей степени соответствует духу решаемых задач.

Базовым положением сорбционных технологий является обеспечение соответствия формы существования сорбата типу ионогенных групп используемого коллектора.

Примем, что в настоящее время в трапных водах АЭС с ВВЭР устойчиво фиксируются четыре основные группы радионуклидов: щелочные ($^{134,137}$Cs), щелочно-земельные ($^{7}$Be) и переходные ($^{54}$Mn, $^{60}$Co) металлы и металлоид ($^{124,125}$Sb) [18, 20, 22, 23].

Наименьшую сложность представляет собой сорбционное извлечение радионуклидов цезия, поскольку они существуют исключительно в катионной форме. Современные сорбенты на основе кристаллических форм смешанных гексацианоферратов сохраняют высокую селективность к этим радионуклидам в широком диапазоне значений pH и концентраций щелочных металлов и аммония в растворе. Последние, в свою очередь, стабилизируют кристаллическую структуру активного слоя фильтрующей загрузки, обеспечивая устойчивость сорбционного материала в процессе эксплуатации.

В группе щелочноземельных металлов конкуренцию $^{7}$Be за сорбционные места составят катионы солей жесткости и стабильных продуктов коррозии конструкционных материалов, концентрации которых на несколько порядков превышают содержание самого бериллия. Более того, в концентрированных растворах его сорбцию способны подавлять даже ионы щелочных металлов [24, 25].

Металлоид $^{124,125}$Sb может существовать в растворе в двух степенях окисления, определяющих его катионную или анионную форму существования, что должно учитываться при выборе метода удаления сурьмы из водной среды.

Наибольшее значение при выборе методов удаления продуктов коррозии, совместно с которыми и удаляются из трапных вод радионуклиды $^{54}$Mn и $^{60}$Co, имеет анионный состав технологического раствора. Его компоненты способны выступать в качестве лигандов, образующих комплексные соединения с полизарядными металлами, тем самым определяя форму существования в растворе и способность к взаимодействию с активными центрами сорбентов.

Анионы в составе трапных вод условно можно разделить на две группы: обязательные, поступающие с организованными протечками, и вероятные, которые могут входить в состав технологических рецептур, используемых в технологических процессах. К обязательно присутствующим анионам, способным выступать в качестве лигандов, следует отнести гидроксид-, гидрокарбонат-/карбонат- и кислородсодержащие соединения бора, основной формой которых наиболее вероятно является тетрагидроксоборат-ионы [26, 27]. Следует отметить, что гидрокарбонат-/карбонат-ионы образуются в щелочных растворах самопроизвольно – за счет поглощения углекислого газа из воздуха, а также вследствие каталитического окисления оксалат-ионов растворенным в трапных водах кислородом. Концентрация этих анионов определяется, в первую очередь, временем контакта щелочного раствора с атмосферным воздухом. В большинстве случаев она значительно превышает концентрацию присутствующих в растворе полизарядных катионов.

При применении катионообменных процессов наличие даже только обязательных лигандов в трапных водах приводит к снижению концентрации в сорбционных процессах формы катиона на величину образующейся молекулярной формы, не способной к взаимодействию с отрицательно заряженными функциональными группами используемого сорбента [28].

В случае образования нейтрально заряженных, следовательно, неактивных в ионообменных процессах, комплексов с монодентатными лигандами, соотношение равновесных концентраций молекулярных $[Me^{2+}(A^-)_2]_s$ и ионных $[Me^{2+}]_s$ форм через произведение ступенчатых констант устойчивости $\beta_1$, $\beta_2$ может быть описано следующим выражением:

$$\frac{\left[Me^{2+}\left(A^-\right)_2\right]_s}{\left[Me^{2+}\right]_s} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left[A^-\right]^2. \quad (1)$$

Преобразуя это уравнение следующим образом

$$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left[A^-\right]^2 + 1 = \frac{\left[Me^{2+}\left(A^-\right)_2\right]_s}{\left[Me^{2+}\right]_s} + 1 = \frac{\left[Me^{2+}\left(A^-\right)_2\right]_s + \left[Me^{2+}\right]_s}{\left[Me^{2+}\right]_s} = \frac{C_{Me^{2+}}}{\left[Me^{2+}\right]_s}, \quad (2)$$

где $C_{Me^{2+}}$ – аналитическая концентрация сорбируемого катиона, получим, что доля сорбируемой формы при условии, что $[A^-] \gg [Me^{2+}]$, составит

$$\frac{\left[Me^{2+}\right]_s}{C_{Me^{2+}}} = \frac{1}{1+\beta_1\beta_2\left[A^-\right]^2} = \frac{1}{1+\beta_1\beta_2\left[A^-\right]^2} \sim \frac{1}{1+10^{\lg(\beta_1\beta_2)+2*\lg\left[A^-\right]}}. \quad (3)$$

При образовании гидроксокомплексов это уравнение можно записать в следующем виде:

$$\frac{\left[Me^{2+}\right]_s}{C_{Me^{2+}}} \sim \frac{1}{1+10^{\lg(\beta_1\beta_2)-2*(14-pH)}}. \quad (4)$$

Значения $\lg(\beta_1 \cdot \beta_2)$ для образования гидроксокомплексов, например, $Be^{2+}$ и $Co^{2+}$, составляют 14,0 и 9,2 соответственно [27]. Следовательно, при pH = 9,0 доли катионных форм сорбируемых металлов составят $1 \cdot 10^{-4}$ и 0,86 соответственно. Это указывает на то, что катионообменные группы в зоне своей активности не способны за разумное время контакта, определяемое динамическим характером процесса «диссоциация комплексной формы → сорбция катиона → диссоциация комплексной формы», эффективно удалять радионуклиды $^7Be$. Однако они способны сорбировать около 95 – 97% радиокобальта, что согласуется с ранее опубликованными данными

[20]. При pH = 6 оба рассматриваемых радионуклида находятся преимущественно в катионной, сорбционно активной форме.

Учитывая значения констант диссоциации углекислой и борной кислот, можно заключить, что при pH ≈ 6 гидрокарбонат- и тетрагидроксоборат-ионы практически утрачивают способность к комплексообразованию с двухзарядными катионами.

В слабощелочной среде при наличии кислорода возможно образование форм $MnO_2$ и $MnO_4^{2-}$, неактивных в катионном обмене. Эти формы являются неустойчивыми даже в слабокислой среде, где преобладают термодинамически стабильные катионные формы $Mn^{2+}$.

Для радионуклидов сурьмы, находящейся в форме 3+, уравнение (4) принимает вид

$$\frac{\left[Sb^{3+}\right]_s}{C_{Sb^{3+}}} \sim \frac{1}{1+10^{\lg(\beta_1\beta_2\beta_3)-3*(14-pH)}}. \quad (5)$$

Значение $\lg(\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3) = 36{,}7$, следовательно, даже в растворах с pH = 9,0 доля катионной формы этого изотопа составит $2 \cdot 10^{-22}$, т.е. практически незначимую величину. Доля сурьмы, находящейся в катионообменной форме, с уменьшением pH возрастает только до $2 \cdot 10^{-13}$, т.е. остается практически незначимой величиной. Из этого вытекает только одна возможность ее удаления из раствора – окисление до Sb(V) и сорбция в виде аниона. При этом образование твердой фазы малорастворимой сурьмяной кислоты маловероятно из-за крайне низкой концентрации ее радионуклидов.

В обрабатываемых средах все радионуклиды полизарядных элементов в принципе не способны сформировать собственную фазу из малорастворимых соединений. Следовательно, классический метод «осветления» растворов путем коагуляции солей железа – через соосаждение коллоидных частиц и дисперсной фазы оксигидрата железа – не обеспечивает надежного удаления этих радионуклидов. Надежда на участие катионных форм железа в образовании полиядерных соединений при медленном гидролизе с последующим переходом этих форм в твердые растворы в процессе коагуляции и старения также не имеет достаточных оснований.

Одновременное введение окислителя, обеспечивающего окисление железа (II) до осаждаемой формы железа (III), может одновременно способствовать частичному переводу радионуклида $^{60}Co$ в трехвалентную форму $Co^{3+}$ [29]. Эта форма, обладающая аналогичными координационными свойствами, потенциально способна внедряться в структуру полимерного оксигидрата железа (III). Для достижения максимально возможной степени очистки целесообразно поддерживать pH обрабатываемого раствора в пределах 4 – 5 для согласования форм существования как радиокобальта, так и вводимого железа (II). При медленном окислении $Fe^{2+}$ до $Fe^{3+}$ образование полиядерных форм и их соосаждение становится весьма вероятным, особенно, при наличии катионов металлов в высших степенях окисления.

В данных условиях переход катионов Be в твердую фазу маловероятен ввиду низкой катионообменной активности оксигидрата Fe в слабокислой среде, а $^{124}Sb$ сохраняет неизменной форму существования и, соответственно, удерживается в растворе. Тем не менее применение солей железа остается оправданным для удаления из трапных вод уже сформированных коллоидных примесей и нефтепродуктов.

## Химическое поведение неорганических и органических анионов и их влияние на процессы очистки

К вероятным анионам в рассматриваемых средах относят фосфат-ионы различных видов, а также анионы этилендиаминтетрауксусной, лимонной и щавелевой кислот, которые могут присутствовать в моющих и дезактивирующих составах и отработанных технологических растворах. Однако их присутствие пока не доказано объективными методами контроля.

Расчеты по вышеописанной методике показали, что при, возможно, завышенной концентрации ортофосфат-ионов (10 мг·дм$^{-3}$) и при pH < 10 доля нейтральных, сорбционно неактивных форм катионов продуктов коррозии не превысит 5%. В щелочной области значительно большую роль в процессах сорбции проявляют гидроксил-ионы; следовательно, присутствие тринатрийфосфата в моющих и дезактивирующих рецептурах вряд ли окажет существенное влияние на сорбцию катионов.

Оксалат-ионы с двухзарядными катионами образуют нейтральные комплексы состава $MeC_2O_4$, низкая растворимость которых широко используется в гидрометаллургии цветных металлов, а при значительном избытке оксалат-ионов относительно центрального атома формируются анионные комплексы вида $[MeL_2]^{2-}$. При той же концентрации оксалат-ионов доля нейтральных комплексов для большинства двухзарядных катионов составляет примерно 60%, а образование анионных форм остается маловероятным.

Даже с учетом эффекта динамического равновесия можно заключить, что в таких условиях коэффициент очистки будет недостаточным для достижения удельной активности раствора, необходимой для последующего получения условно-чистых обезвоженных солей.

Цитрат- и ЭДТА-анионы образуют с катионами продуктов коррозии устойчивые хелаты состава $[Me(II)L]^{2-}$ или $[Me(III)L]^{-}$, соли которых характеризуются высокой растворимостью в широком диапазоне pH. Способность ЭДТА-ионов количественно связывать катионы поливалентных металлов хорошо известна и находит широкое применение в количественном анализе, что позволяет однозначно идентифицировать состав образующихся комплексных форм активированных продуктов коррозии. Именно анионная форма существования этих комплексов ставит под сомнение возможность их разрушения путем химического окисления при низких температурах. Более того, ацетат-анионы/уксусная кислота относятся к числу наименее поддающихся окислению соединений, что отражено в методиках определения химического потребления кислорода (ХПК) природных и сточных вод. Активность аминосоединений по отношению к анионам-окислителям возможна лишь в сильнокислой среде; последующая нейтрализация избыточной кислоты неизбежно приведет к увеличению количества радиоактивно загрязненных солей и объема химических отходов.

Отсутствие прямых экспериментальных данных о снижении концентрации ЭДТА-ионов в радиоактивных растворах при использовании типичных окислительных реагентов подтверждает сомнительность предложенного подхода. Достоверные сведения о разложении ЭДТА имеются лишь при электролитическом окислении на инертных анодах [30, 31], требующем крайне высоких энергетических затрат и потому

технологически нецелесообразном.

Таким образом, использованная авторами [20] при разработке системы ионоселективной очистки гипотеза о полной деструкции всех ионогенных органических соединений разбавленными растворами пероксида водорода в присутствии катализаторов ее разложения не имеет достаточного научного обоснования.

Метод «мокрого окисления» по Циммерману требует проведения процесса при условиях, близких к критической точке воды, что при переработке радиоактивных сред сопряжено с чрезмерными рисками. Вероятно, именно это обстоятельство стало причиной остановки работ по использованию различных вариантов «мокрого сжигания» в технологиях обращения с РАО в начале 1980-х гг.

Вместе с тем хорошо известен факт образования прочных и хорошо растворимых, а главное – стабильных по знаку заряда, хелатоподобных комплексных форм с ионами переходных металлов, включая радионуклиды, что обосновывает целесообразность их удаления методом анионного обмена [32, 33]. В слабокислой среде оксигидраты металлов диссоциируют с отщеплением гидроксильных групп, приобретая положительный заряд поверхности и проявляя выраженную способность к адсорбции анионов для его нейтрализации. В этом случае эффект электроселективности должен обеспечить преимущественное поглощение анионов с большим знаком заряда. При реализации этого направления использование окислителей нежелательно, поскольку повышение заряда катиона усиливает устойчивость комплекса, но одновременно понижает заряд комплексного аниона до –1, что вызывает конкуренцию с фоновыми анионами, прежде всего нитрат-анионами. В щелочной среде процесс анионного обмена практически подавлен вследствие крайне низкой растворимости оксигидрата железа.

## Заключение

Несложный анализ литературных данных показывает, что при соблюдении действующих нормативных требований внедренный технологический процесс [20] не способен одновременно удовлетворить как регламентированным нормам, так и экономическим интересам эксплуатирующей организации. Это свидетельствует о недостаточной экспертной проработке решения со стороны проектной организации и обусловливает необходимость проведения дополнительной ведомственной экспертизы технологических инноваций главным эксплуатантом – АО «Концерн Росэнергоатом». Такой подход оправдан и тем, что селективное выделение радионуклидов может быть реализовано посредством альтернативных методов разделения.

В перспективе целесообразно разделять радионуклиды по периоду полураспада – упаковки с долгоживущим $^{137}Cs$ перемещать в объекты «вечной» изоляции, а короткоживущие активированные продукты коррозии хранить на площадке АЭС. При предположительном сроке вывода АЭС из эксплуатации в несколько десятилетий [34] к завершению демонтажа основные радионуклиды претерпят значительный распад.

Приведенные данные показывают, что на первом этапе научно-технически обоснованным решением для очистки трапных вод АЭС является применение селективной сорбции в общепринятом понимании этого термина. В частности, для удаления катионных форм радионуклидов коррозионного происхождения и бериллия целе-

сообразно использовать неорганические катиониты на основе дигидрофосфатов титана; ресурсная база для их промышленного производства в настоящее время существует [35].

Для интенсификации процесса сорбции целесообразно воспользоваться хорошо известным фактом, что поглощающая способность полизарядных ионов катионитами возрастает с уменьшением суммарной концентрации электролитов в растворе и увеличением температуры процесса (достаточно – до ~50°C), поддержание которой в условиях практически неограниченного количества требующей утилизации тепловой энергии низких параметров не представляет существенной технической проблемы.

Для разделения радионуклидов по периоду полураспада возможно применение мембранных методов, например, нанофильтрации. Она эффективно удерживает в ретентате крупноразмерные ионы с малой подвижностью – комплексоны и комплексонаты и полимерные и другие комплексные формы активированных продуктов коррозии (включая, вероятно, полимерные формы сурьмы), пропуская при этом в пермеат соли щелочных металлов и аммония. Последующая доочистка пермеата на гексаферроатных сорбентах позволяет получить воду с показателями, удовлетворяющими нормативам допустимого стока.

Растворимость комплексонатов металлов (II, III) относительно невысока и составляет ~1 М, что позволяет выделять их в виде сухих солей методом изотермической кристаллизации. При этом замена глубокого упаривания, повышающего расход электроэнергии на собственные нужды, на изотермическую кристаллизацию, потребляющую тепловую энергию с низкими параметрами, позволит получить более чистые соли, облегчая их размещение на полигонах химических отходов.

Следует отметить, что для реализации концепции минимизации общехимических и радиоактивных отходов требуется модернизация существующих установок обработки радиоактивных сред. Существующая техническая база в значительной степени отличается от доступных в 70-х гг. прошлого века средств обеспечения нормативных требований. Поэтому истинно инновационные методы, предполагающие объединение достаточно разнородных устройств со своими характеристическими аппаратурно-техническими параметрами, могут быть объединены в единый технологический комплекс с гибкими схемами согласования, адаптируемыми под текущие показатели качества технологических растворов.

При этом важно учесть, что капитальные затраты установленного оборудования не всегда отражают долгосрочные экономические показатели, достигаемые в долговременном срезе его эксплуатации. Только на этапе эскизного проектирования, выполняемого по единой методике, принятой в проектирующем подразделении, и с учетом логистики доставки и размещения образующихся отходов в местах их изоляции можно оценить реальные выгоды от внедрения тех или иных решений. Окончательная оценка качества предложенных вариантов и их соответствие нормативам должна являться прерогативой квалифицированной экспертизы – как последней ответственной инстанции.

**Финансирование**

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание FSEN-2023-0002).

### *Литература*

1. Чугунов А.С., Винницкий В.А. Локальные системы для реализации концепции организации раздельного сбора и переработки жидких радиоактивных сред АЭС с ВВЭР. *Радиоактивные отходы*. 2021;4(17):44–56. DOI: https://doi.org/10.25283/2587-9707-2021-4-44-56

2. Чугунов А.С., Винницкий В.А. Инновационные методы обращения с радиоактивно загрязненными водами АЭС – окна возможностей. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:103–114. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.10

3. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., Поваров В.П., Стацура Д.Б. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;3:5–21. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01

4. Дуб А.В., Юханов В.А. Оценка срока службы действующих реакторных установок ВВЭР-1000. *Тяжелое машиностроение*. 2009;12:9–12.

5. Глебов А.П. Развитие атомной энергетики в России и мире с реакторами поколений 3+ и 4. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2020;1:77–93. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-77-93

6. Авезниязов С.Р., Стахив М.Р. Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС. *Радиоактивные отходы*. 2018;4(5):49–54.

7. Качан П.П.,Краснов И.М., Стахив М.Р. Опыт эксплуатации комплекса переработки радиоактивных отходов на Смоленской АЭС. *Радиоактивные отходы*. 2018;1(2):34–41.

8. Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А., Савкин А.Е., Лащенов С.М. Обращение с кубовыми остатками АЭС. *Атомная энергия*. 2000;89(5):365–372. URL: https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3106 (дата обращения 01.11.2025).

9. Савкин А.Е., Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А., Голобоков С.М., Сластенников Ю.Т., Синякин О.Г. Возможность применения сорбционного метода для очистки жидких радиоактивных отходов АЭС. *Радиохимия*. 1999;41(2):172–176.

10. Чугунов А.С., Нечаев А.Ф. Особенности проблемы «обезвреживания» радиоактивных концентратов атомных электростанций и пути ее решения. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2011;10(36):32–38. URL: https://science.spb.ru/content-iti/10-36-2011 (дата обращения 01.11.2025).

11. Мацкевич Г.В., Кузьменко Л.Б., Рогачев Е.Ф., Хрубасик А., Шмидт Ю. Установка глубокого упаривания радиоактивных солевых растворов. Патент РФ № 2129314, 1999. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2129314&TypeFile=html (дата обращения 01.11.2025).

12. Радиохимия и химия ядерных процессов (Под ред. Мурина А.Н., Нефедова В.Д., Шведова В.П.). Ленинград, Гос. научно-техническое издательство химической литературы, 1960, 784 с.

13. Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. (Под ред. чл.-кор. АН СССР В.М. Вдовенко). Москва, Атомиздат, 1974, 360 с.

14. Арустамов А.Э., Савкин А.Е., Зинин А.В., Красников П.В., Прилепо Ю.П., Перевезенцев В.В., Свитцов А.А., Хубецов С.Б. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций. *Безопасность жизнедеятельности*. 2005;11:13–16. URL: http://novtex.ru/bjd/bgd05/number11.htm (дата обращения 01.11.2025).

15. Омельчук В.В., Стахив М.Р., Савкин А.Е., Федоров Д.А., Корнев В.И. Разработка технологии переработки кубовых остатков на Кольской АЭС. *Безопасность окружающей среды*. 2007;3:34–37.

16. Корнюшкина О.В., Загородних А.А. Основные направления деятельности по обращению с радиоактивными отходами в АО «Концерн Росэнергоатом». Шестой научно-техни-

ческий семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», г. Санкт-Петербург 26.06.2023-29.06.2023.

17. Пензин Р.А., Свитцов А.А. Развитие технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами АЭС. *Радиоактивные отходы*. 2020;4(13):90–98. DOI: https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-4-90-98

18. Волков А.С., Наливайко Е.М. Обращение с радиоактивными отходами на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 проекта АЭС-2006. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;3:183–194. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.17

19. Витковский С.Л., Данилов А.П., Щедрин М.Г., Колягина И.А. Опыт освоения проектной химической технологии при пусконаладочных работах и вводе блока в промышленную эксплуатацию. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;3:172–182. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.16

20. Поваров В.П., Гусев И.Н., Росновский С.В., Стацура Д.Б., Казанский В.Р., Гончаров Е.В., Мельников Э.С., Волков А.С., Булка С.К., Иванов Е.В., Корнеев И.И. Опыт внедрения систем ионоселективной очистки трапных вод от радионуклидов на блоках 1–2 НВАС-2. *АНРИ*. 2020;4(103):64–70. DOI: https://doi.org/10.37414/2075-1338-2020-103-4-64-70

21. Хоникевич А.А. Очистка радиоактивно загрязненных вод лабораторий и исследовательских ядерных реакторов. Москва, Атомиздат, 1974, 312 с.

22. Шаров Д.А., Семёновых А.С., Иванов Е.А., Аржаткин В.Г., Крутских Д.А., Маракулин И.И., Тяпков В.Ф., Юдаков А.Ю., Барабин А.В., Гусев И.Н., Поваров В.П., Росновский С.В., Стацура Д.Б., Щукин А.П., Курындин А.В. Определение источников поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды при эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1200. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2023;2(108):82–96. DOI: https://doi.org/10.26277/SECNRS.2023.108.2.005

23. Семеновых А.С., Шаров Д.А., Иванов Е.А., Маракулин И.И. Анализ международного опыта решения проблемы образования радиоизотопов сурьмы в первом контуре реакторных установок. *АНРИ*. 2023;3(114):3–17. DOI: https://doi.org/10.37414/2075-1338-2023-114-3-3-17

24. Гельферих Ф. Иониты. Основы ионного обмена. Москва, Издательство иностранной литературы, 1962, 492 с.

25. Вольдман Г.М. Основы экстракционных и ионообменных процессов гидрометаллургии. Москва, Металлургия, 1982, 375 с.

26. Smith R.M., Martell A.E. Critical Stability Constants. Volume 4, Inorganic Complexes. New York, Plenum Press, 1976, 257 p.

27. Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов (под ред. С.А. Симановой). Санкт-Петербург, АНО НПО «Профессионал», 2004, 998 с.

28. Чугунов А.С., Румянцев А.В., Винницкий В.А., Нечаев А.Ф. Влияние неорганических лигандов на эффективность ионообменной переработки радиоактивных отходов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2015;1:119–127. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.13

29. Lee J., Singh B., Hafeez M., Oh K., Um W. Comparative study of PMS oxidation with Fenton oxidation as an advanced oxidation process for Co-EDTA decomplexation. *Chemosphere*. 2022; 300:134494. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134494

30. Мусакин Д.А., Олейник М.С., Шуйский Д.Б., Доильницын В.А. Очистка сточных вод от комплексонов и комплексонатов электрохимическим окислением. В кн. Исследования по химии, технологии и применению радиоактивных веществ. Ленинград, изд. ЛТИ им. Ленсовета, 1981, с. 140.

31. Олейник М.С., Ларин Э.Б., Мусакин Д.А., Шуйский Д.Б., Доильницын В.А. Электрохимическая обработка сбросных растворов, содержащих щавелевую и лимонные кислоты.

В кн. Исследования по химии, технологии и применению радиоактивных веществ. Ленинград, ЛТИ им. Ленсовета, 1984, с. 115.

32. Седов В.М., Овсянников А.И., Вьюнов А.Н. Поведение гидроксокомплексов железа (III) с ЭДТА и НТА при сорбции ионообменными материалами. В кн. Термодинамика и структура гидроксокомплексов в растворах: тез. докл. III Всесоюзного совещания. Ленинград, Наука, 1980, с. 86.

33. Овсянников А.И., Седов В.М., Доильницын В.А., Вьюнов А.Н. Исследование процессов сорбции комплексонов и комплексонов железа ионообменными материалами. В кн. Сборник докладов первой межотраслевой конференции по водно-химическим режимам теплоносителей АЭС (том 2). Ленинград, Ротапринт ВНИПИЭТ, 1979, с. 120.

34. Василенко В.А., Ефимов А.А., Степанов И.К. и др. Технологии обеспечения радиационной безопасности на объектах с ЯЭУ (под общ. ред. В.А. Василенко). Госкорпорация «Росатом», НИТИ им. А.П. Александрова, Санкт-Петербург, Моринтех, 2010, 575 с. ISBN 978-5-93887-055-0.

35. Герасимова Л. Г., Николаев А. И., Артеменков А. Г., Щукина Е.С., Маслова М.В., Киселев Ю.Г. Получение титаносиликатных сорбентов на пилотной установке. *Химическая технология*. 2022;23(11):471–477. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3418 (дата обращения 01.11.2025).

Поступила в редакцию 10.07.2024
После доработки 06.11.2025
Принята к опубликованию 27.11.2025

**Авторы**
Чугунов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник, к.х.н.,
E-mail: tchugunov@mail.ru
Винницкий Вадим Александрович, доцент, к.т.н.,
E-mail: ivinnicciy@gmail.com

UDC 621.039.73

## Integration of Regulatory Requirements and Scientific-Technical Principles in the Development of Treatment Systems for VVER NPP Trap Wastewater

**Chugunov A.S., Vinnitskii V.A.**

*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 26 Moskovsky Ave., 190013 Saint-Petersburg, Russia*

### Abstract

The article discusses the operational specifics of nuclear power plants (NPPs) in the context of managing liquid radioactive media. It is emphasized that traditional technologies for handling and compact storage of such media, based on the principle of zero discharge of radioactive substances beyond the NPP site, are becoming technologically obsolete and economically inefficient under the new regulatory requirements (Federal Law No. 89-FZ «On Industrial and Consumer Waste» and Federal Law No. 190-FZ «On Radioactive Waste Management...»). The trial operation of a new trap water treatment system at Units 1 and 2 of NVAES-2 was analyzed, identifying the reasons for incomplete achievement of design performance indicators. A comprehensive scientific and technical justification for the application of ion-selective sorption is presented. The conditions for the formation of cationic, anionic, and neutral complexes involving ligands ($OH^-$, oxalate, phosphate anions, etc.) are described, along with the influence of pH on the proportion of sorption-

active forms of radionuclides ($^{7}$Be, $^{60}$Co, $^{124,125}$Sb). As a promising approach, radionuclide sorting by half-life using membrane nanofiltration is proposed. This method retains large, low-mobility ions in the retentate – such as complexing agents, complexonates, and other complex forms of activated corrosion products, as well as possible polymeric forms of antimony–while allowing alkali metal and ammonium ions to pass into the permeate. In conclusion, the necessity of integrated consideration of both regulatory-legal and natural-scientific factors in the design of modern NPP trap water treatment systems is substantiated.

**Keywords:** legal and normative regulation, nuclear power plant effluents, environmental protection, trap waters, liquid radioactive waste processing system.

**For citation:** Chugunov A. S., Vinnitskii V. A. Integration of Regulatory Requirements and Scientific-Technical Principles in the Development of Treatment Systems for VVER NPP Trap Wastewater. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:80–95. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.06 (in Russian).

## References

1. Chugunov A.S., Vinnitskii V.A. Local Systems Enabling the Concept of Separate Collection and Processing of Liquid Radioactive Medium at NPPs with WWER Reactor Units. *Radioactive Waste*. 2021;4(17):44–56. DOI: https://doi.org/10.25283/2587-9707-2021-4-44-56 (in Russian).

2. Chugunov A.S., Vinnitsky V.A. Innovative Methods for Handling Radioactively Contaminated Water from NPPs – windows of opportunity. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022;2:103–114. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.10 (in Russian).

3. Asmolov V.G., Gusev I.N., Kazansky V.R., Povarov V.P., Statsura D.B. New Generation Head Unit – Features of the VVER-1200 Project. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:5–21. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01 (in Russian).

4. Dub A.V., Yukhanov V.A. Assessment of the Service Life of Operating VVER-1000 Reactor Plants. *Tyazheloye mashinostroyeniye*. 2009;12:9–12 (in Russian).

5. Glebov A.P. Development of Nuclear Energy in Russia and the World with Reactors of Generations 3+ and 4. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2020;1:77–93. DOI: https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-77-93 (in Russian).

6. Avezniyazov S.R., Stakhiv M.R. Experience of Recycling the Liquid Radioactive Waste at the Kola NPP. *Radioactive Waste*. 2018;4(5):49–54 (in Russian).

7. Kachan P.P., Krasnov I.M., Stakhiv M.R. Experience in Exploiting the Radioactive Waste Recycling Complex at the Smolensk NPP. *Radioactive Waste*. 2018;1(2):34–41 (in Russian).

8. Dmitriev S.A., Lifanov F.A., Savkin A.E., Lashchenov S.M. Handling of the Bottom Residues of a Nuclear Power Plant. *Atomic Energy*. 2000;89(5):884–889. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1011338231351

9. Savkin A.E., Dmitriev S.A., Lifanov F.A., Golobokov S.M., SlastennikovYu.T., Sinyakin O.G. Possibility of Using the Sorption Method for the Purification of Liquid Radioactive Waste from Nuclear Power Plants. *Radiokhimiya*. 1999;41(2):172–176 (in Russian).

10. Chugunov A.S., Nechaev A.F. Features of the Problem of “Neutralization” of Radioactive Concentrates from NPPs and ways to solve it. *Izvestiya SPGTI(TU)*. 2011;10(36):32–38. URL: https://science.spb.ru/content-iti/10-36-2011 (accessed Nov. 01, 2025) (in Russian).

11. Matskevich G.V., Kuzmenko L.B., Rogachev E.F., Khrubasik A., Schmidt J. Plant for Deep Evaporation of Radioactive Salt Solutions. Patent RF No. 2129314, 1999. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2129314&TypeFile=html (accessed Nov. 01, 2025) (in Russian).

12. Radiochemistry and Chemistry of Nuclear Processes (Eds. Murin A.N., Nefedov V.D., Shvedov V.P.). Leningrad. State Sci. and Techn. Publ. House of Chemical Literature, 1960, 784 p. (in Russian).

13. Kuznetsov Yu.V., Shchebetkovsky V.N., Trusov A.G. Fundamentals of Water Purification from Radioactive Contamination (Ed. Corr. Mem. USSR AS V.M. Vdovenko). Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 360 p. (in Russian).

14. Arustamov A.E., Savkin A.E., Zinin A.V., Krasnikov P.V., Prilepo Yu.P., Perevezentsev V.V., Svitsov A.A., Khubetsov S.B. Method of ion-selective purification of liquid radioactive waste from nuclear power plants. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2005;11:13–16. URL: http://novtex.ru/bjd/bgd05/number11.htm (accessed Nov. 01, 2025) (in Russian).

15. Omel'chuk V.V., Stahiv M.R., Savkin A.E., Fedorov D.A., Kornev V.I. Development of Technology and Processing of Distillation Residues at the Kola NPP. *Bezopasnost' Okruzhajuschej Sredy*. 2007;3:34–37 (in Russian).

16. Kornyushkina O.V., Zagorodnikh A.A. Main Areas of Activity for Radioactive Waste Management at Rosenergoatom Concern JSC. Sixth scientific and technical seminar "Problems of processing and conditioning of radioactive waste", St. Petersburg, June 26–29, 2023 (in Russian).

17. Penzin R.A, Svitsov A.A. Development of Technologies for Handling Liquid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants. *Radioactive Waste*. 2020;4(13):90–98. DOI: https://doi.org/10.25283/25879707202049098 (in Russian).

18. Volkov A.S., Nalivayko E.M. Radioactive Waste Management at the Novovoronezh NPP II-1 (NPP-2006 Design). *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:183–194. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.17 (in Russian).

19. Vitkovsky S.L., Danilov A.P., Shchedrin M.G., Kolyagina I.A. The Experience of Implementing the Design Chemistry During the NVNPP II-1 Commissioning. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:172–182. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.16 (in Russian).

20. Povarov V.P., Gusev I.N., Rosnovsky S.V., Statsura D.B., Kazansky V.R., Goncharov E.V., Mel'nikov E.S., Volkov A.S., Bulka S.K., Ivanov E.A., Korneev I.I. Experience in Implementation of Systems Applied for Drainage Water Ion-Selective Purification from Radionuclides at Units 1, 2 of Novovoronezh-2 NPP. *ANRI*. 2020;4(103):64–70. DOI: https://doi.org/10.37414/20751338202010346470 (in Russian).

21. Honikevich A.A. Purification of Radioactively Contaminated Waters of Laboratories and Research Nuclear Reactors. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 312 p. (in Russian).

22. Sharov D.A., Semjonovykh A.S., Ivanov E.A., Arzhatkin V.G., Krutskikh D.A., Marakulin I.I., Tyapkov V.F., Judakov A.Ju., Barabin A.V., Gusev I.N., Povarov V.P., Rosnovsky S.V., Statsura D.B., Schukin A.P., Kuryndin A.V. Determination of sources of antimony radioisotopes entering the drain water due to operation of the VVER-1200 reactor. *Nuclear and Radiation Safety Journal*. 2023;2(108):82–96. DOI: https://doi.org/10.26277/SECNRS.2023.108.2.005 (in Russian).

23.Semenovykh A.S., Sharov D.A., Ivanov E.A., Marakulin I.I. Analysis of International Experience in Solving the Problem of Antimony Radioisotope Formation in the First Circuit of Reactor Installations. *ANRI*. 2023;3(114):3–17. DOI: https://doi.org/10.37414/2075-1338-2023-114-3-3-17 (in Russian).

24. Helfferich F. Ion exchange. New York, McGraw-Hill Book Co., 1962, 622 p.

25. Voldman G.M. Fundamentals of Extraction and Ion Exchange Processes of Hydrometallurgy. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 375 p. (in Russian).

26. Smith R.M., Martell A.E.Critical Stability Constants. Volume 4, Inorganic Complexes. New York, Plenum Press, 1976, 257 p.

27. New Reference Book for Chemist and Technologist. Chemical Balance. Properties of Solutions (ed. by S.A. Simanova). Saint-Petersburg, ANO NPO "Professional" Publ., 2004, 998 p. (in Russian).

28. Chugunov A.S., Rumyantsev A.V., Vinnitskiy V.A., Nechaev A.F. Influence of inorganic ligands on effectiveness of radioactive waste ion-exchange processing. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015;1:119–127. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.13 (in Russian).

29. Lee J., Singh B., Hafeez M., Oh K., Um W. Comparative study of PMS oxidation with Fenton oxidation as an advanced oxidation process for Co-EDTA decomplexation. *Chemosphere*. 2022; 300:134494. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134494

30. Musakin D.A., Oleinik M.S., Shuisky D.B., Doilnitsyn V.A. Purification of Wastewater from Complexones and Complexonates by Electrochemical Oxidation. In the book: Research on Chemistry, Technology and Application of Radioactive Substances. Leningrad, LTI im. Lensoveta Publ., 1981, p. 140 (in Russian).

31. Oleinik M.S., Larin E.B., Musakin D.A., Shuisky D.B., Doilnitsyn V.A. Electrochemical Treatment of Waste Solutions Containing Oxalic and Citric Acids. In the book Research on Chemistry, Technology and Application of Radioactive Substances. Leningrad, LTI im. Lensoveta PUbl., 1984, p. 115 (in Russian).

32. Sedov V.M., Ovsyannikov A.I., Vyunov A.N. Behavior of HydroxoComplexes of Iron (III) with EDTA and NTA During Sorption by Ion-Exchange Materials. In the book Thermodynamics and Structure of HydroxoComplexes in Solutions: abstr. III All-Union Conference. Leningrad, Nauka Publ., 1980, p. 86 (in Russian).

33. Ovsyannikov A.I., Sedov V.M., Doilnitsyn V.A., Vyunov A.N. Study of the Processes of Sorption of Complexones and Iron Complexones by Ion-Exchange Materials. In the book Collection of Reports of the First Interindustry Conference on Water-Chemical Regimes of Nuclear Power Plant Coolants (volume 2). Leningrad, Rotaprint VNIPIET, 1979, p. 120 (in Russian).

34. Technologies for Ensuring Radiation Safety at Facilities with NPPs. ed. V.A. Vasilenko; State atom corporation Energy «Rosatom», NITI im. A.P. Alexandrova, Saint-Petersburg, Morintech, 2010, 575 p. ISBN 978-5-93887-055-0 (in Russian).

35. Gerasimova L.G., Nikolaev A I., Artemenkov A.G., Shchukina E.S., Maslova M.V., Kiselev Yu.G. Pilot-Plant Production of Titanosilicate Sorbents. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2023;57(5):1066–1072. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040579523050093

## Authors

Aleksandr S. Chugunov, senior researcher of the department of engineering radioecology and radiochemical technology, Cand. Sci. (Chem.),
E-mail: tchugunov@mail.ru
Vadim A. Vinnitskii, associate professor of the department of engineering radioecology and radiochemical technology, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: ivinnicciy@gmail.com