

ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ РАЗДЕЛЬНОГО СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ СРЕД АЭС С ВВЭР

А. С. Чугунов, В. А. Винницкий

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 09 сентября 2021 г.

В статье показано, что существующие технологические подходы, применяемые к решению задач по переработке радиоактивных отходов (РАО), ориентированы на долговременное и компактное хранение накопленных РАО на промплощадке АЭС, что приводит к необходимости их повторной переработки в конечный продукт, соответствующий критериям приемлемости для размещения в пунктах захоронения. Переход от смешения радиоактивных стоков к их сортировке и переработке на специализированных локальных установках с относительно низкой производительностью позволит селективно концентрировать и разделять биологически опасные компоненты. Представлены физико-химические особенности процессов сорбционного концентрирования, соосаждения радионуклидов и локализации характерных для АЭС боро- и азотосодержащих химических отходов.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, жидкие радиоактивные среды (ЖРС), радиоактивные концентраты, раздельная переработка радиоактивных отходов, ионоселективные неорганические сорбенты.

Признание за ядерной энергетикой статуса экологически безопасной пока базируется лишь на отсутствии выбросов, содержащих так называемые парниковые газы, в первую очередь — диоксид углерода. Однако спектр экологического воздействия всех без исключения энергогенерирующих объектов значительно шире.

Так, все объекты тепловой энергетики, использующие паросиловой цикл, пока еще являются и активными загрязнителями гидросферы, поскольку сбрасывают в нее некоторые химические продукты своей «жизнедеятельности», общими из которых являются отработанные технологические растворы, используемые для восстановления эксплуатационных характеристик элементов системы химводоочистки (ХВО)

и блочных очистных установок (БОУ). Отвод же значительного количества тепла от конденсаторов турбин приводит к повышению среднегодовой температуры воды технологических гидротехнических сооружений, что способствует развитию избыточной биомассы. Повышение концентрации солей и микроорганизмов отрицательно сказывается на эксплуатации систем водоочистки, сокращая длительность рабочего периода фильтроцикла, и теплоэнергетического оборудования, биообрастание которого снижает теплоотведение по сравнению с рекомендуемой величиной [1]. В настоящее время единственным методом поддержания солевого фона в технологических водоемах является водообмен между ними и природной гидрографической

сеть, что в конечном итоге приводит к нарушению сложившегося в ней экологического равновесия.

При эксплуатации АЭС в штатном режиме к этим проблемам добавляется еще одна — поступление в окружающую среду радиоактивных веществ, выход которых за пределы первого контура предотвратить пока не представляется возможным.

На начальном этапе развития атомной энергетики было принято достаточно обоснованное для того времени решение: радикально сократить объем накапливаемых отходов универсальным методом — упариванием, чему способствовало и наличие достаточного количества доступной тепловой энергии. Возврат выпара в технологический цикл снижал потребности в деминерализованной воде, производимой на установке ХВО, и в то же время сокращал поступление солей в гидросферу.

Требование достижения минимального объема подлежащих долговременному хранению радиоактивных отходов и явилось основной причиной применения в качестве регенерирующего агента азотной кислоты, все соли которой обладают высокой растворимостью при практически приемлемой коррозионной активности. В качестве конечных форм, после отверждения ЖРО, рассматривались битумный компаунд [2, 3] и солевой плава [4]. Отсутствие на большинстве станций стабильно работающих установок по кондиционированию РАО привело к сверхнормативному заполнению емкостей для временного хранения радиоактивных концентратов (кубовых остатков), ЕКО, превратив их, по сути, в хранилища твердых радиоактивных солей.

Резкое сокращение оперативного запаса свободных объемов в ЕКО, способных обеспечить размещение новых порций кубовых остатков, образующихся при нормальных условиях эксплуатации, явилось стимулом к разработке методов опорожнения хранилищ. В рамках поиска решения этой задачи было разработано несколько вариантов, которые можно разделить на три основные группы:

- совместное выделение биологически опасных компонентов (химических и радиоактивных веществ) с последующим кондиционированием солей в виде солевого плава [4], цементного [5, 6] или геоцементного [7] компаундов;
- разделение компонентов кубового остатка на радиоактивную и общехимическую составляющие, с размещением каждой из них в соответствующих классу опасности местах изоляции [1, 8—11, 13];

- трансформация солей, содержащихся в радиоактивных концентратах, для повторного использования в технологическом цикле АЭС и кондиционирование радиоактивных веществ совместно с солями, не представляющими практического интереса [14—16].

Целесообразность реализации третьего направления вызывает сомнения, поскольку представляется маловероятной возможность организации на АЭС производства, позволяющего получать продукты товарного качества, подтвержденного соответствующим сертификатом.

Первое направление представляет собой ставший стандартным метод обращения с жидкими радиоактивными средами с модернизацией конечной фазы кондиционирования РАО.

Это вызывает как минимум три вопроса — логистика перемещения упаковок отходов, устойчивость собственно упаковки в условиях долговременной изоляции и наличие естественной безопасности размещенных в ней биологически опасных компонентов. Понятно, что при гарантированном сроке службы бетонных контейнеров типа НЗК в 50 лет [17] и сопоставимом сроке устойчивости размещенного в них цементного компаунда о сколь-либо серьезном прогнозе их поведения даже на 300—500 лет говорить не приходится. Неопределенность с долговременной устойчивостью инженерных барьеров безопасности должна вызвать интерес к созданию компаундов, обладающих еще и естественной безопасностью, уровень которой определяется в первую очередь формой существования заключенных в них веществ. Представляется достаточно очевидным включение в цементный компаунд соединений, неактивных при взаимодействии с грунтовыми водами, например, за счет крайне низкой растворимости, что резко снизит концентрацию радиоактивных веществ в поровой воде и, соответственно, диффузионный поток этих веществ.

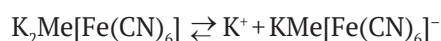
Этой логике в наибольшей степени соответствует второй подход, получивший в некоторых посвященных этой проблеме работах, опубликованных в отечественной литературе, наукообразное наименование «ионоселективная сорбция радионуклидов» [18].

Подход базируется на гипотезе о существовании неких материалов, способных эффективно поглощать радионуклиды вне зависимости от состава технологического раствора. В качестве обоснования этой гипотезы приводится крайне неудачный с научной точки зрения пример — сорбция радионуклидов ^{137}Cs осадками смешанных гексацианоферриатов [19—21]. Ионообменные свойства этих малорастворимых двойных

солей достаточно давно доказаны [22–24] и определены соответствующие им ряды селективности, исключаяющие специфичность этих соединений к радионуклидам цезия.

Ионообменный характер процесса сорбции с присущей ему обратимостью означает наличие жесткой взаимосвязи между эффективностью работы материала, определяемой его внутренней структурой [25], и полным химическим составом очищаемого раствора. Для всех ионообменных материалов значение равновесной обменной емкости определяется двумя факторами: количеством способных к обмену групп и относительной концентрацией поглощаемых ионов.

Как правило, в качестве сорбентов используют малорастворимые двойные соли калия или аммония, для которых сорбционные характеристики определяются существованием набора равновесий, сложившихся между ионогенными группами и ионами, содержащимися в двойном ионном слое раствора, прилегающем к поверхности гранул. Основную роль играет диссоциация исходной формы сорбента:



где Me — катионы Ni^{2+} или Cu^{2+} .

Отметим, что диссоциация по второй ступени означает переход соли в растворенную форму.

Весьма вероятно, что образование наиболее доступных для обмена групп, расположенных на поверхности поликристаллического слоя, покрывающего гранулы носителя сорбента, будет описываться уравнением Гендерсона — Хассельбаха

$$p[K^+] = pK_{дис} + \lg \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

$$p[NH_4^+] = pK_{дис} + \lg \frac{\alpha}{1-\alpha},$$

где $K_{дис}$ — кажущаяся константа диссоциации функциональных групп по i -ступени;

α — степень диссоциации функциональных групп рассматриваемой ступени диссоциации при фиксируемом значении pH рассчитывается как:

$$\alpha_1 = \frac{KMe[Fe(CN)_6]^-}{K_2Me[Fe(CN)_6]},$$

$$\alpha_1 = \frac{NH_4Me[Fe(CN)_6]^-}{(NH_4)_2Me[Fe(CN)_6]}.$$

Для непористых кристаллических солей можно принять, что концентрация обменных ионов, образующихся при диссоциации функциональных групп, сосредоточена в двойном ионном слое и в первом приближении равна концентрации этих ионов в растворе. Таким образом, увеличение их концентрации в очищаемом растворе будет приводить к снижению равновесной, а следовательно, и рабочей емкости сорбента.

В смешанных растворах концентрация электролитов в двойном ионном слое пропорциональна их концентрации в растворе. При контакте сорбента с таким раствором происходит перераспределение всех подвижных ионов. Содержащиеся в жидких радиоактивных средах ионы радиоцезия, взаимодействуя со свободными ионогенными группами, практически не меняют их равновесную концентрацию из-за аналитической ничтожности, вплоть до достижения предельно допустимого значения удельной активности сорбента. Колебания концентраций структурообразующих противоионов в обрабатываемом растворе будут значительно менять в первую очередь количество способных к поглощению радионуклидов цезия и, соответственно, скорость их поглощения активных групп, определяя эффективность дезактивации раствора.

Из опыта использования слабодиссоциирующих ионообменных смол хорошо известно — повышение количества способных к сорбции групп достигается изменением ионной формы товарной поставки на противоионы, к которым функциональные группы ионита проявляют меньшее сродство. В рассматриваемом случае такими ионами являются ионы легких щелочных металлов лития и натрия. Эта операция может быть проведена как на стадии подготовки сорбента, так и непосредственно в процессе его эксплуатации. Замещение изначально структурообразующих катионов калия и аммония ионами натрия, происходящее в растворах, солевой фон которых формируется солями последних, приводит к повышению степени диссоциации и возрастанию рабочей обменной емкости. Этим и может быть объяснен феномен гексацианоферриатных сорбентов, способных выводить радионуклиды цезия из концентратов АЭС, основу солевого фона которых и составляет нитрат натрия. Исходя из этого можно сделать вывод, что и значение концентрации ионов натрия должно лежать в некотором диапазоне значений, в котором уже обеспечено вытеснение противоионов товарной формы, но еще не происходит подавление диссоциации.

Таким образом, все внешние проявления специфичности гексацианоферриатных сорбентов

находят свое объяснение в рамках хорошо известных общих представлений об ионообменных процессах.

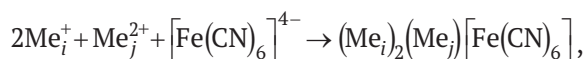
Следовательно, достижение требуемой степени извлечения радиоцезия в результате переработки растворов переменного состава и получения практически приемлемой удельной активности сорбента в принципе возможно при:

- фиксированном удельном расходе сорбента — за счет коррекции времени контакта с технологическим раствором;
- постоянном времени контакта — за счет коррекции удельного расхода сорбента или состава раствора.

Наиболее технологичным способом одновременной реализации этих подходов представляется использование метода ионообменной фильтрации с параллельно включаемыми/подключаемыми элементами. Настройка системы под особенности ЖРС и сорбента не представляет сложности при одном условии — стабильности гидродинамических и физико-химических свойств партии сорбента, загруженного в параллельно включенные/подключаемые фильтры.

Отсутствие гарантированного обеспечения поставок сорбентов с жестко воспроизводимыми и зафиксированными в нормативно-технической документации характеристиками тормозит разработку унифицированной технологии обращения с ЖРС, подобной системам ХВО или БОУ (конденсатоочистки). В этой связи отметим, что в качестве эталона для разработки новых сорбентов можно было бы принять эксплуатационные характеристики сорбента «Термоксид-35» [26], приемлемая воспроизводимость которых и обеспечила его популярность.

В принципе, право на развитие имеют и методы соосаждения радионуклидов с гексацианоферриатами непосредственно в ЖРС. Формальную реакцию образования двойных гексацианоферриатов можно представить следующим уравнением:



где Me_i — катионы щелочных металлов и аммония; Me_j — катионы 3d-металлов.

Таким образом, малорастворимые двойные соли формируют все катионы, присутствующие в трапных водах. Отметим, что сами радионуклиды не способны сформировать собственную твердую фазу, но присутствие их химических аналогов и обеспечивает очистку раствора за счет протекания реакции соосаждения с изоморфными носителями. При использовании такого подхода в технологическом растворе

следует поддерживать восстановительную среду, обеспечивающую катионную форму существования продуктов коррозии с зарядом 2+.

Хорошо известно, что весьма низкая растворимость двойных гексацианоферриатов способствует образованию коллоидных, практически не осветляемых принятыми методами отстаивания и фильтрования, форм. Как показали исследования, полученные мелкодисперсные осадки наиболее эффективно отделяются от маточного раствора методами мембранной фильтрации. При использовании в этом режиме анизотропных патронных элементов для микрофильтрации наиболее крупные частицы задерживаются в порах, формируя вспомогательный фильтрующий слой (рис. 1), обладающий сорбционными свойствами [27].

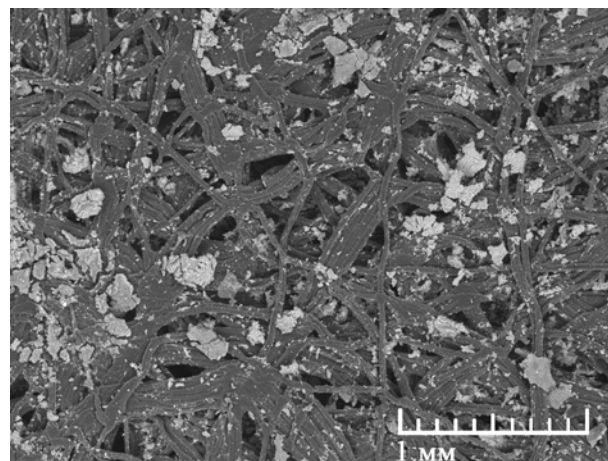


Рис. 1. Морфология слоя, формирующегося на внешней поверхности фильтроэлемента

Есть все основания полагать, что накопленная масса сорбента, которая может занимать 70—80% от геометрического объема патрона, продолжит выполнять функции ионообменника.

Если основной причиной недостижимости желаемого результата при очистке растворов от радиоцезия признается качество примененного сорбента, то проблемы, возникающие при выведении из ЖРС активированных продуктов коррозии, в первую очередь радионуклидов ^{60}Co , связывают уже с наличием в растворе анионов, способных связывать эти металлы в комплексные формы [11, 28—33]. Считается, что эти формы неактивны в сорбционных и осадительных процессах и удерживают значимую часть радионуклидов в обрабатываемом растворе.

При образовании бинарного комплекса доля комплексной формы металла α связана с концентрацией свободного лиганда $[\text{L}]$ и ступенчатой константой устойчивости β соотношением:

$$\alpha = \frac{\beta \cdot [L]}{1 + \beta \cdot [L]}$$

Неактивными в сорбционных процессах, в том числе обеспечивающих соосаждение радионуклидов с неизоморфными носителями, являются незаряженные комплексные соединения, которые в рассматриваемом случае представлены двухзарядными анионами — тетраборатами, моногидрофосфатами, карбонатами, сульфатами и оксалатами.

Отметим, что ЭДТА-ионы образуют отрицательно заряженные комплексные соединения, которые как раз активны в сорбционных, но только анионообменных процессах, протекающих в том числе и на оксигидратных соединениях металлов при их коагуляции в слабокислой области.

Неорганические лиганды образуют комплексные соединения с двухзарядными катионами цветных металлов, составляющих основу продуктов коррозии конструкционных материалов, их константа образования — ~100, в то время как для комплексных форм с оксалат-ионами она равна ~10⁵, а с ЭДТА-ионами — ~10⁹. Если принять гипотезу о неактивности комплексных форм в существующих системах очистки, то коэффициент очистки раствора $K_{оч}$ обратно пропорционален доле комплексной формы:

$$K_{оч} = \frac{1}{\alpha}$$

В реально действующих системах $K_{оч} \geq 100$, то есть $\alpha \leq 0,01$. В этом случае равновесная концентрация лиганда может быть оценена как:

$$[L] = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1000 \cdot MB}{\beta \cdot K_{оч}}$$

где MB — молекулярный вес лиганда, или, выражая концентрацию в принятой на практике размерности мг/дм³:

$$[L] = \frac{1000 \cdot MB}{\beta \cdot K_{оч}}$$

Таким образом, коэффициент очистки 100 по активированным продуктам коррозии может быть достигнут при концентрации оксалат-ионов ~100 мг/дм³, а ЭДТА-ионов — всего 0,1 мг/дм³. Присутствие в кубовых остатках таких количеств оксалат-ионов маловероятно. Нитрат-ионы весьма слабые окислители, но высокая температура, близкая к температуре кипения насыщенного раствора нитрата натрия (~108 °С), наличие катализаторов и длительность упаривания хотя и интенсифицируют процессы окисления оксалат-ионов [34], но не способны разрушить термически

устойчивые соединения — собственно ЭДТА-ионы и комплексные соединения с ними. Представляется маловероятной возможность достижения столь низких равновесных концентраций этих лигандов с использованием других доступных окислителей.

Допустимая концентрация неорганических лигандов лежит уже в граммовом диапазоне, который и может быть достигнут в радиоактивных концентратах, образующихся при упаривании трапных вод. Наиболее вероятно, что именно эти обстоятельства и не позволяют достичь высокой степени очистки растворов при размыве кристаллофазы, находящейся в ЕКО, даже после окисления органических соединений озоном [35]. Отметим наиболее интересный момент — достаточно глубокую очистку от ⁶⁰Со позволило достичь осаждение с серосодержащими лигандами [36], в частности диэтилдитиокарбаматом. По сути, очистку обеспечил обмен лигандами, приведший к образованию комплексной формы, обладающей значительно меньшей растворимостью.

Аналогичный метод изменения формы существования лигандов в ЖРС может быть осуществлен и заменой центральных атомов. Наиболее характерным использованием этого подхода служит регенерация ионитов. При ней большие количества ионов, к которым функциональные группы проявляют меньшее сродство, вытесняют ионы со значительно большей энергией связи. Наиболее удобными для решения этой задачи представляются ионы кальция, образующие со всеми неорганическими лигандами и оксалат-ионами малорастворимые соединения, а с ЭДТА-ионами — прочные комплексы. Кроме того, избыток этих центральных атомов, обусловленный достаточно высокой растворимостью гидроокиси кальция даже в слабощелочных средах, характерных для радиоактивных концентратов, приведет к вытеснению микроколичеств продуктов коррозии из их комплексных форм с последующим соосаждением в виде оксигидратов, обладающих крайне низкой растворимостью. Отметим, что такой процесс может быть проведен в условиях гомогенного осаждения, в результате которого образуются твердые растворы активированных продуктов коррозии в матрице из карбоната кальция или оксигидратов железа и марганца. Необходимым условием реализации этого направления является равенство заряда осаждаемых катионов, в данном случае 2+. Таким образом, для создания оптимальных условий сокристаллизации окислительный режим должен быть заменен на восстановительную среду, например, введением гидразингидрата.

Организация достаточно сложных систем выведения радионуклидов имеет смысл только в том случае, если перемещение радиоактивных отходов в места вечной изоляции будет носить регулярный характер и эксплуатирующая организация столкнется с реальным уровнем расходов. Наиболее вероятно, что это произойдет при снятии АЭС с эксплуатации, поэтому основной целью приведенных рассуждений является привлечение внимания разработчиков технологий и оборудования, а также сотрудников проектирующих организаций к тому факту, что дезактивация многокомпонентных растворов, каковыми

и являются радиоактивные концентраты, не такая простая задача, которая может быть решена набором некоторых «универсальных» методов. Этот подход противоречит сложившемуся в гидрометаллургии принципу [37] — согласованию свойств взаимодействующих сред с режимами эксплуатации, пренебрежение которым и приводит к результатам, приведенным в работе [13]. В свете вышеизложенного можно предположить, что высокоэффективными могут быть только локальные системы очистки, структура которых адаптирована под состав конкретного потока (табл. 1).

Таблица 1. Перечень потоков и объем сбросов в систему переработки трапных вод АЭС нового поколения с ВВЭР-640 [38]

Поток	Среднее содержание, г/дм ³	Объем, м ³ /год		Среднечасовой расход, дм ³ /ч	Удельная активность потоков, Гбк/м ³
		работа на мощности	при ППР		
Вода от гидровыгрузки, взрыхления и отмывки фильтров	0–2	432	148	66	10 ³ –10 ⁻³
Регенерационные растворы ионообменных фильтров	40–50	108	–	12	10 ⁻¹ –10 ⁻⁴
Растворы химпромывок выпарных аппаратов	40	50	50	11	10 ¹ –10 ⁵
Отмывочная вода при химпромывке выпарных аппаратов	0–2	50	50	11	10 ² –10 ⁻⁵
Отработанные дезактивирующие растворы	5–30	20	75,5	11	1–10 ⁻⁷
Отмывочная вода после дезактивации оборудования и помещений	0–2	50	200	29	10 ² –10 ⁻²
Воды от пробоотбора и радиохимических лабораторий (в т. ч. 1-го контура)	0–40	650 (3)	80	83	10 ² –10 ⁻²
Неорганизованные протечки оборудования вспомогательных систем, дренажи оборудования вспомогательных систем и неучтенные протечки (20 %)	–	268	116,5	44	–
Общий объем обрабатываемой в системе воды	–	1630	720	268	–

Из этого перечня следует, что только три потока могут содержать значимые количества комплексобразующих веществ: отработанные дезактивирующие растворы, растворы химических промывок выпарных аппаратов и воды гидрперегрузки отработанных сорбентов.

Как следует из данных, приведенных на рис. 2, дренажи емкости хранения отработанных сорбентов в обязательном порядке будут содержать борную кислоту и поэтому должны направляться в уже существующую систему ее регенерации.

Как уже отмечалось, комплексонаты активированных продуктов коррозии представляют собой анионы, хорошо сорбируемые низкоосновными анионитами, выпуск которых уже освоен отечественной промышленностью [39]. Инактивацию неорганических лигандов, обычно представленных различными фосфатами, обеспечивают протонированные формы катионитов. Минимальная производительность

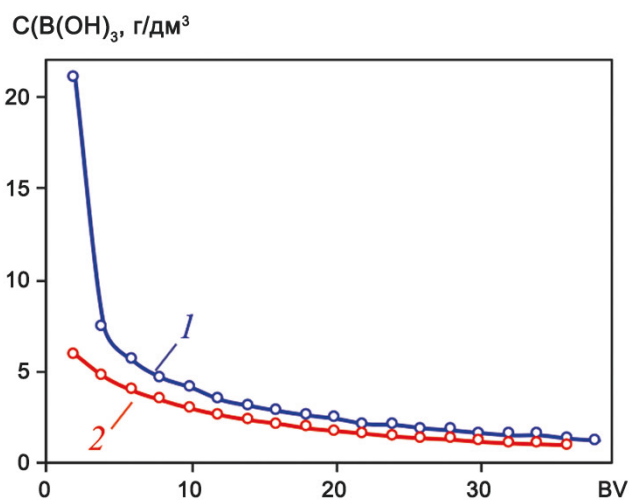


Рис. 2. Выходная кривая поступления борной кислоты в транспортные воды при гидровыгрузке и взрыхлении боратной формы анионита АВ-17-8, насыщенного борной кислотой с концентрацией 40 г/дм³ (1) и 6 г/дм³ (2), BV — колонный объем

установки, обеспечивающая переработку этих ЖРС в непрерывном режиме, составит 0,05 м³/ч. Отработанные иониты перемещаются в емкость хранения отработанных сорбентов. При использовании фильтр-контейнеров сорбенты изолируются вместе с ними.

Использование ионообменных методов выведения комплексонов и комплексонатов из растворов промывки и дезактивации практически исключается из-за сильного конкурирующего действия нитрат-ионов. В этих системах предпочтение следует отдать осадительным методам с последующим выведением радиоцезия. Расчетная производительность такой системы непрерывного действия — 0,025 м³/ч.

Остальные растворы не содержат комплексообразующих веществ, поэтому для их дезактивации целесообразно использовать систему, включающую в себя отделение дисперсных примесей, выделение активированных продуктов коррозии на комплексообразующем катионите с карбоксильными или фосфорнокислотными группами и удаление радиоцезия на гексацианоферриатном сорбенте. Аналогичный подход был апробирован при переработке ЖРС ВМФ РФ [40].

Такая комбинация установок может обеспечить поступление в выпарной аппарат и сушилку для солей уже «чистых» растворов и в полном объеме реализовать декларированный в работах [1, 10, 13] «идеальный» экологически чистый метод переработки ЖРС АЭС, позволяющий исключить попадание в гидротехнические сооружения каких-либо биологически неприемлемых веществ. Понятно, что реализация этого направления возможна только при наличии баков-накопителей для сбора соответствующих ЖРС, монтаж которых на действующих и уже спроектированных АЭС затруднителен, и поэтому использование рассмотренного подхода в разумный период времени представляется маловероятным. Надеемся, что авторам этой перспективной разработки удастся довести ее до стадии ввода в промышленную эксплуатацию.

Пока же в предлагаемых к реализации проектах АЭС в целом сохраняется традиционная система переработки трапных вод. Для сокращения объема подлежащих «вечной» изоляции отходов предлагается [41]:

- исключить поступление в трапные воды борной кислоты;
- отказаться от регенерации фильтров систем спецводоочистки, рабочий период которых превышает год;
- обеспечить отведение регенерационных растворов системы обеспечения водно-химического

режима парогенераторов, вод спецпрачечной и санпропускников в гидротехнические сооружения АЭС.

Наибольший интерес представляет последний пункт этих предложений. Предполагается, что гарантировать защиту гидросферы АЭС должна автономная система на основе ионоселективных неорганических сорбентов [41]. Это обстоятельство допускает их модернизацию вплоть до создания гибких схем, адаптируемых под состав используемых для дезактивации спецодежды рецептур, поэтому возможность обеспечения нормативов допустимого сброса в принципе не вызывает сомнений.

Солевой фон отработанных регенерационных растворов, отведение которых планируется в брызгальный бассейн, представлен азотнокислыми солями натрия, аммония и моноэтаноламина. Хорошо известно, что соединения азота способствуют росту биомассы, поэтому такое решение в долгосрочном плане приведет к возникновению проблем, связанных с ускорением биообращения теплопередающих поверхностей градирен и разделительных поверхностей баромембранных аппаратов, уже достаточно широко используемых в системах ХВО АЭС.

Действующими в РФ нормативами СанПиН допустимая концентрация моноэтаноламина в водах хозяйственно-бытового назначения установлена 0,5 мг/дм³. Основным методом удаления этого соединения из техногенных вод считается окисление. Хорошо известно, что наиболее легко оно протекает у спиртовой группы и приводит в итоге к образованию α -аминоуксусной кислоты — соединения, хорошо известного и применяемого даже в фармакологии под наименованием глицин. Эта первичная аминокислота, входя в структуру многих белков, хорошо усваивается микроорганизмами, тем самым способствуя повышению различных органических веществ во внутренних водоемах АЭС. Двойственность этого соединения определяют и его комплексообразующие свойства, обеспечивая удержание в растворе ионов цветных и тяжелых металлов, снижая эффективность работы систем ХВО, ответственных за обеспечение АЭС водой высокой чистоты.

Таким образом, локальная система очистки отработанных регенерационных растворов в обязательном порядке должна гарантировать не только не превышение норм содержания радионуклидов в сточных водах, но и их качество по компонентам, поступление которых в технические водоемы АЭС в долгосрочном плане способно привести к перерастанию экологических

вопросов в вопросы безопасной эксплуатации энергоблоков.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых — кандидатов наук МК-3825.2021.4 (Винницкий В. А.) и Минобрнауки Проект 0785.00.X6019 (Чугунов А. С.).

Литература

1. 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 высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 172—182. DOI: 10.26583/пре.2017.3.16.
2. Никифоров А. С., Захарова К. П., Поляков А. С. Физико-химические основы битумирования жидких радиоактивных отходов АЭС с РБМК и свойства образующихся компаундов // Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 3. С. 159—162.
3. Баринов А. С., Дробышевский Н. И. Свойства битумных компаундов и требования к их захоронению // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 37—45.
4. Сорокин В. Т. Обоснование безопасности захоронения солевого плава, образующегося на установках глубокого упаривания АЭС, размещенного в контейнерах НЗК-150-1,5П // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 31—40. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-31-40.
5. Горбунова О. А., Камаева Т. С. Физические и химические способы регулирования свойств цементных компаундов с борсодержащими жидкими радиоактивными отходами // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 1. С. 69—76.
6. Захарова К. П., Химченко О. М., Суханов Л. П., Александров В. В., Сальников А. А., Хромовских Е. В., Пушкарев В. М. Разработка технологического режима цементирования солевых концентратов Волгодонской АЭС // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 5. С. 309—314.
7. Мишевец Т. О., Богданович Н. Г., Коновалов Э. Е., Грушичева Е. А. Кондиционирование кубовых остатков АЭС с использованием процессов сорбции, кристаллизации и цементирования // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2007. № 4. С. 72—83.
8. Качан П. П., Краснов И. М., Стахов М. Р. Опыт эксплуатации комплекса переработки радиоактивных отходов на Смоленской АЭС // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 33—41.
9. Савкин А. Е., Адамович Д. В., Белый М. Д. Варианты обращения с радиоактивными отходами АЭС // Вопросы атомной науки и техники. Серия Материаловедение и новые материалы. 2014. № 3 (78). С. 87—95.
10. Волков А. С., Наливайко Е. М. Обращение с радиоактивными отходами на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 проекта АЭС-2006 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 183—194. DOI: 10.26583/пре.2017.3.17.
11. Савкин А. Е. Разработка и испытание технологии переработки жидких радиоактивных отходов АЭС // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 5. С. 470—473.
12. Авезниязов С. Р., Стахов М. Р. Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 49—54.
13. 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). С. 64—70. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-64-70.
14. Свитцов А. А., Ильина С. И., Иванов С. В., Салтыков Б. В. Анализ современных методов переработки кубовых остатков атомных электрических станций // Вестник Московского энергетического института. 2021. № 1. С. 39—43. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-39-43.
15. Пат. RU 2652978 С1 Российская Федерация, МПК G21F9/06, G21F9/20. Способ переработки жидких отходов АЭС с борным регулированием / Иваненко В. И., Седнева Т. А., Локшин Э. П., Корнейков Р. И.; патентообладатель ФИЦ КНЦ РАН, АО «Концерн Росэнергоатом»; заявл. 12.04.2017; опубл. 04.05.2018. // Бюллетень патентов. 2018. № 13.
16. Чугунов А. С., Винницкий В. А. Ионообменные материалы для очистки борной кислоты, получаемой из нетрадиционных источников сырья // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2014. № 27 (53). С. 61—66.
17. Гатауллин Р. М., Меделяев И. А., Шарафутдинов Р. Б. Использование перспективных технологий для решения проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 4 (50). С. 68—75.
18. 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. С. 13—16.
19. Vincent T., Vincent C., Guibal E. Immobilization of metal hexacyanoferrate ion-exchangers for the synthesis of metal ion sorbents — a mini-review // Molecules. 2015. Vol. 20. № 11. Pp. 20582—20613. DOI: 10.3390/molecules201119718.

20. Sharygin L., Muromskiy A., Kalyagina M. et al. A granular inorganic cation-exchanger selective to cesium // Journal of nuclear science technology. 2007. Vol. 44. № 5. Pp. 767–773. DOI: 10.3327/jnst.44.767.
21. Figueiredo B., Cardoso S., Portugal I. et al. Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater // Separation and purification reviews. 2018. Vol. 47. № 4. Pp. 306–336. DOI: 10.1080/15422119.2017.1392974.
22. Плющев В. Е., Степин В. Д. Аналитическая химия рубидия и цезия. — М.: Наука, 1975. 224 с.
23. Шведов В. П., Иванова Л. М., Жариков В. И. Выделение радиоактивного цезия из морской воды. I. Выделение цезия в виде соединений с ферроцианидами цинка, меди и никеля // Радиохимия. 1963. Т. 5. № 2. С. 182–185.
24. Иванова Л. М., Шведов В. П. Выделение радиоактивного цезия из морской воды. II. Выделения цезия в виде соединений с ферроцианидами щелочноземельных элементов // Радиохимия. 1963. Т. 5. № 2. С. 185–189.
25. Шарыгин Л. М., Муромский А. Ю., Калягина М. Л. Структура и свойства селективного к цезию гранулированного неорганического катионообменника // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. № 6. С. 965–971.
26. Шарыгин Л. М., Муромский А. Ю. Неорганический сорбент для ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов // Радиохимия. 2004. Т. 46. № 2. С. 171–175.
27. Чугунов А. С., Винницкий В. А. Диализные мембраны на основе микрофильтрационных элементов для разделения компонентов жидких радиоактивных сред АЭС осадительными методами // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 5. С. 263–269.
28. Radionuclide — chelating agent complexes in low-level radioactive decontamination waste; stability, adsorption and transport potential: technical report NUREG/CR-6758 / Pacific Northwest National Laboratory; prepared by R. J. Serne [et al.]. Richland, 2002. 124 p.
29. Лагунова Ю. О. Использование озона и пероксида водорода для окислительного разложения органических комплексов в процессах очистки жидких радиоактивных отходов : Дисс. канд. хим. наук. — Москва, ИФХЭ РАН им. А. Н. Фрумкина, 2012. 159 с.
30. Лифанов Ф. А., Савкин А. Е., Слостенников Ю. Т. Очистка высокосолевых жидких радиоактивных отходов методом селективной сорбции // Вопросы материаловедения. 1997. № 5 (11). С. 22–27.
31. Селиверстов А. Ф., Лагунова О. Ю., Ершов Б. Г., Гелис В. М., Басиев А. Г. Выделение радиоактивного кобальта из водных растворов ЭДТА с использованием концентрированного озона // Радиохимия. 2009. Т. 51. № 3. С. 286–288.
32. Дмитриев С. А., Лифанов Ф. А., Кобелев А. П., Савкин А. Е. Опыт обращения с радиоактивными отходами в ГУП МосНПО «Радон» // Медицина труда и промышленная экология. 2006. № 2. С. 21–25.
33. Камруков А. С., Новиков Д. О. Современные окислительные и фотоокислительные методы разрушения комплексов в жидких радиоактивных отходах // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4. № 1. С. 68–83.
34. 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). С. 32–38.
35. Савкин А. Е. Совершенствование технологии очистки кубовых остатков Колькой АЭС от радионуклидов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 4(105). С. 51–59.
36. Пат. RU 2122753 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/06. Способ переработки жидких отходов, содержащих радионуклиды / Дмитриев С. А., Лифанов С. А., Нечаев А. Ф., Савкин А. Е., Чечельницкий Г. М., Чугунов А. С., Шибков С. Н.; патентообладатель ТОО «Лаборатория технологической водоочистки — Наука Ltd.»; заявл. 30.10.1997; опубл. 27.11.1998 // Бюллетень патентов. 1998. № 33.
37. Мухленов И. П., Горштейн А. Е., Тумаркина Е. С. Основы химической технологии / Под ред. И. П. Мухленова. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1991. 463 с.
38. Онуфриенко С. В. Обращение с жидкими радиоактивными отходами в проектах АЭС нового поколения с реактором ВВЭР : Дисс. канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Атомэнергопроект», 2002. 146 с.
39. Ионообменные смолы. Фенольные смолы. Компания Токем. — URL: <https://www.token.ru/> (дата обращения: 01.06.2021).
40. Нечаев А. Ф., Чугунов А. С., Степанов Е. А. Модернизация технологической платформы глубокой переработки радиоактивных отходов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2010. № 8 (34). С. 66–70.
41. Материалы обоснования лицензии на осуществление деятельности в области использования атомной энергии. Размещение энергоблока № 4 Ленинградской АЭС-2 ОАО «Концерн Энергоатом». URL: http://www.greenworld.org.ru/?q=laes-2_14211 (дата обращения 04.07.2021).

Информация об авторах

Чугунов Александр Сергеевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры инженерной радиоэкологии и радиохимической технологии, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26), e-mail: tchugunov@mail.ru.

Винницкий Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной радиоэкологии и радиохимической технологии, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26), e-mail: ivinnicciy@gmail.com.

Библиографическое описание статьи

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). С. 44–56. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-44-56.

LOCAL SYSTEMS ENABLING THE CONCEPT OF SEPARATE COLLECTION AND PROCESSING OF LIQUID RADIOACTIVE MEDIUM AT NPP WITH WVER REACTOR UNITS

Chugunov A. S., Vinnitskii V. A.

Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg, Russia

Article received on September 09, 2021

The study shows that the engineering methods applied in radioactive waste (RW) processing are mainly focused on long-term compact storage of accumulated RW inventory at the industrial sites of NPPs. Therefore, the RW should be additionally treated to obtain a final product that would meet the final disposal acceptance criteria. The transition from liquid radioactive effluent mixing practice to its separate collection and processing at purpose-designed local units with relatively low productive capacity will enable selective concentration and separation of biologically hazardous components. The paper presents physical and chemical features of the sorption concentration processes, coprecipitation of radionuclides and the containment of boron-containing and nitrogen-containing chemical waste being considered typical for nuclear power plants.

Keywords: radioactive waste, liquid radioactive waste, radioactive concentrates, separate processing of radioactive waste, ion-selective inorganic sorbents.

This study has been supported by the grant of the President of the Russian Federation for young scientists-candidates of sciences MK-3825.2021.4 (Vinnitskiy V. A.) and the Ministry of Education and Science under the Project 0785.00.Kh6019 (Chugunov A. S.).

References

1. Vitkovsky S. L., Danilov A. P., Shchedrin M. G., Kolyagina I. A. Opyt osvoeniya proyektnoy khimicheskoy tekhnologii pri puskonaladochnykh

rabotakh i vvode bloka v promyshlennuyu ekspluatatsiyu [Experience in mastering a design chemical technology during the pre-commissioning of an NPP unit and its commissioning to enable its full-scale commercial operation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika — News of Higher Education. Nuclear energy*, 2017, no. 3, pp. 172–182. DOI: 10.26583/npe.2017.3.16.

2. Nikiforov A. S., Zakharova K. P., Polyakov A. S. Fiziko-khimicheskiye osnovy bitumirovaniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov AES s RBMK i svoystva obrazuyushchikhsya kompaundov [Physical and

chemical foundations for the bituminization of liquid radioactive waste from nuclear power plants with RBMK units and the properties of the resulting compounds]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 1986, vol. 61, iss. 3, pp. 159—162.

3. Barinov A. S., Drobyshevsky N. I. Svoistva bitumnykh kompaundov i trebovaniya k ikh zakhoroneniyu [Properties of Bituminous Compounds and Requirements for their Disposal]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 37—45.

4. Sorokin V. T. Obosnovanie bezopasnosti zakhoroneniya solevogo plava, obrazuyushchegosya na ustanovkakh glubokogo uparivaniya AEHS, razmeshchennogo v konteinerakh NZK-150-1,5P [Disposal Safety Justification for Salt Melt Generated at NPP Evaporation-to-the-maximum-salt Concentration Plants and Packed in NZK-150-1.5P Containers]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 31—40. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-31-40.

5. Gorbunova O. A., Kamaeva T. S. Fizicheskiye i khimicheskiye sposoby regulirovaniya svoystv tsementnykh kompaundov s borsoderzhashchimi zhidkimi radioaktivnymi otkhodami [Physical and chemical methods used to adjust the properties of cement compounds with boron-containing liquid radioactive waste]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of material processing*, 2013, no. 1, pp. 69—76.

6. Zakharova K. P., Himchenko O. M., Sukhanov L. P., Aleksandrov V. V., Salnikov A. A., Khromovskikh E. V., Pushkarev V. M. Razrabotka tekhnologicheskogo rezhima tsementirovaniya solevykh kontsentratov Volgodonskoy AES [Development of a process method enabling the cementation of salt concentrates of the Volgodonsk NPP]. *Atomnaya Energiya — Atomic Energy*, 2007, vol. 103, no. 5, pp. 309—314.

7. Mishevets T. O., Bogdanovich N. G., Kononov E. E., Grushicheva E. A. Konditsionirovaniye kubovykh ostatkov AES s ispol'zovaniyem protsessov sorbtzii, kristallizatsii i tsementirovaniya [Conditioning of NPP bottoms via sorption, crystallization and cementing processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika — News of Higher Education. Nuclear energy*, 2007, no. 4, pp. 72—83.

8. Kachan P. P., Krasnov I. M., Stakhiv M. P. Opyt ehkspluatatsii kompleksa pererabotki radioaktivnykh otkhodov na Smolenskoi AEHS [Experience of exploiting the radioactive waste recycling complex at the Smolensk NPP]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 1 (2), pp. 33—41.

9. Savkin A. E., Adamovich D. V., Belyi M. D. Varianty obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami AES [Radioactive Waste Management Options at Nuclear Power Plants]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Materialovedeniye i novyye materialy — Issues*

of Atomic Science and Technology. Materials Science and New Materials Series, 2014, no. 3 (78), pp. 87—95.

10. Volkov A. S., Nalivaiko E. M. Obrashcheniye s radioaktivnymi otkhodami na bloke № 1 Novovoronezhskoy AES-2 proyekta AES-2006 [Management of radioactive waste at unit No. 1 of Novovoronezh NPP-2 under the NPP-2006 project]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika — News of Higher Education. Nuclear energy*, 2017, no. 3, pp. 183—194. DOI: 10.26583/npe.2017.3.17.

11. Savkin A. E. Razrabotka i ispytaniye tekhnologii pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov AES [Development and testing of a processing method for liquid radioactive waste from nuclear power plants]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2011, vol. 53, no. 5, pp. 470—473.

12. Avezniyazov S. R., Stakhiv M. R. Experience of recycling the liquid radioactive waste at the Kola NPP. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 49—54.

13. Povarov V. P., Gusev I. N., Rosnovsky S. V., Stat-sura D. B., Kazansky V. R., Goncharov E. V., Melnikov E. S., Volkov A. S., Bulka S. K., Ivanov E. V., Korneev I. I. Opyt vnedreniya sistem ionoselektivnoy ochistki trapnykh vod ot radionuklidov na blokakh 1—2 NVAS-2 [Experience in the implementation of systems for the ion-selective treatment of drainage waters from radionuclides at units 1—2 at NVAS-2]. *ANRI — ANRI*, 2020, no. 4 (103), pp. 64—70. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-64-70.

14. Svitsov A. A., Ilyina S. I., Ivanov S. V., Saltykov B. V. Analiz sovremennykh metodov pererabotki kubovykh ostatkov atomnykh elektricheskikh stan-tsiy [Analysis of modern methods designed for the processing of still residues at nuclear power plants]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. — Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2021, no. 1, pp. 39—43. DOI: 10.24160 / 1993-6982-2021-1-39-43.

15. Ivanenko V. I., Sedneva T. A., Lokshin E. P., Korneikov R. I. *Sposob pererabotki zhidkikh otkhodov AES s bornym regulirovaniyem* [Processing method for liquid waste from nuclear power plants with boron shim]. *Patent RU 2652978 C1*. Applicant Federal State Budgetary Science Institution Federal Research Centre “Kola Science Centre of RAS”, “Rosenergoatom» Joint Stock Company”; application date: 12.04.2017; publication date: 04.05.2018. Patent bulletin, 2018, no. 13.

16. Chugunov A. S., Vinnitskiy V. A. Ionoobmennyye materialy dlya ochistki bornoy kisloty, poluchayemoy iz netraditsionnykh istochnikov syr'ya [Ion exchange materials used to treat boric acid resulted from unconventional sources of raw materials]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) — Bulletin*

- of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2014, no. 27 (53), pp. 61–66.
17. Gataullin R. M., Medelyaev I. A., Sharafutdinov R. B. Ispol'zovaniye perspektivnykh tekhnologiy dlya resheniya problem bezopasnogo obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami [The use of promising technologies to address the challenges of safe radioactive waste management]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2008, no. 4 (50), pp. 68–75.
18. Arustamov A. E., Savkin A. E., Zinin A. V., Krasnikov P. V., Prilepo Yu. P., Perevezentsev V. V., Svitsov A. A., Khubetsov S. B. Metod ionoselektivnoy ochistki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov atomnykh stantsiy [Ion-selective treatment method for liquid radioactive waste from nuclear power plants]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti — Civil Defense*, 2005, no. 11, pp. 13–16.
19. Vincent T., Vincent C., Guibal E. Immobilization of metal hexacyanoferrate ion-exchangers for the synthesis of metal ion sorbents — a mini-review. *Molecules*, 2015, vol. 20, no. 11, pp. 20582–20613. DOI: 10.3390/molecules201119718.
20. Sharygin L., Muromskiy A., Kalyagina M. et al. A granular inorganic cation-exchanger selective to cesium. *Journal of nuclear science technology*, 2007, vol. 44, no. 5, pp. 767–773. DOI: 10.3327/jnst.44.767.
21. Figueiredo B., Cardoso S., Portugal I. et al. Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater. *Separation and purification reviews*, 2018, vol. 47, no. 4, pp. 306–336. DOI: 10.1080/15422119.2017.1392974.
22. Plushev V. E., Stepin V. D. *Analiticheskaya khimiya rubidiya i tseziya* [Analytical chemistry of rubidium and cesium]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 224 p.
23. Shvedov V. P., Ivanova L. M., Zharikov V. I. Vydeleniye tseziya v vide soyedineniy s ferrotsianidami tsinka, medi i nikelya [Extraction of radioactive cesium from seawater. I. Extraction of cesium in the form of compounds with ferrocyanides of zinc, copper and nickel]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 1963, vol. 5, no. 2, pp. 182–185.
24. Ivanova L. M., Shvedov V. P. Vydeleniye radioaktivnogo tseziya iz morskoy vody. II. Vydeleniya tseziya v vide soyedineniy s ferrotsianidami shchelochnozemel'nykh elementov [Extraction of radioactive cesium from seawater. II. Extraction of cesium in the form of compounds with ferrocyanides of alkaline earth elements]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 1963, vol. 5, no. 2, pp. 185–189.
25. Sharygin L. M., Muromskiy A. Yu., Kalyagina M. L. Struktura i svoystva selektivnogo k tseziyu granulirovannogo neorganicheskogo kationoobmennika [Structure and properties of cesium-selective granular inorganic cation exchanger]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy — Sorption and chromatographic processes*, 2006, vol. 6, no. 6, pp. 965–971.
26. Sharygin M. L., Muromskiy A. Yu. Neorganicheskiy sorbent dlya ionoselektivnoy ochistki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [Inorganic sorbent for ion-selective treatment of liquid radioactive waste]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2004, vol. 46, no. 2, pp. 171–175.
27. Chugunov A. S., Vinnitskiy V. A. Dializnyye membrany na osnove mikrofil'tratsionnykh elementov dlya razdeleniya komponentov zhidkikh radioaktivnykh sred AES osaditel'nyimi metodami [Microfiltration element-based dialysis membranes enabling the separation of individual components from liquid radioactive media at nuclear power plants via precipitation methods]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2019, vol. 127, no. 5, pp. 263–269.
28. *Radionuclide — chelating agent complexes in low-level radioactive decontamination waste; stability, adsorption and transport potential*: technical report NUREG/CR-6758 / Pacific Northwest National Laboratory; prepared by R. J. Serne [et al.]. Richland, 2002. 124 p.
29. Lagunova Yu. O. *Ispol'zovaniye ozona i peroksida vodoroda dlya okislitel'nogo razlozheniya organicheskikh kompleksonov v protsessakh ochistki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [The use of ozone and hydrogen peroxide for the oxidative decomposition of organic complexones during the treatment of liquid radioactive waste]. Cand. chem. sci. diss. Moscow, IPCE RAS Publ., 2012. 159 p.
30. Lifanov F. A., Savkin A. E., Slastennikov Yu. T. Ochistka vysokosolevykh zhidkikh radioaktivnykh otkhodov metodom selektivnoy sorbtzii [Treatment of high-salt liquid radioactive waste by selective sorption]. *Voprosy materialovedeniya — Issues of Materials Science*, 1997, no. 5 (11), pp. 22–27.
31. Seliverstov A. F., Lagunova O. Yu., Ershov B. G., Gelis V. M., Basiev A. G. Vydeleniye radioaktivnogo kobal'ta iz vodnykh rastvorov EDTA s ispol'zovaniyem kontsentriruyemogo ozona [Extraction of radioactive cobalt from aqueous EDTA solutions using concentrated ozone]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 286–288.
32. Dmitriev S. A., Lifanov F. A., Kobelev A. P., Savkin A. E. Opyt obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami v GUP MosNPO «Radon» [Radioactive waste management experience of the State Unitary Enterprise MosNPO Radon]. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya — Labor medicine and industrial ecology*, 2006, no. 2, pp. 21–25.
33. Kamrukov A. S., Novikov D. O. Sovremennyye okislitel'nyye i fotookislitel'nyye metody razrusheniya kompleksonov v zhidkikh radioaktivnykh otkhodakh [Modern oxidative and photooxidative methods for the destruction of complexones in

liquid radioactive waste]. *Bezopasnost' v tekhnosfere — Safety in the technosphere*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 68–83.

34. Chugunov A. S., Nechaev A. F. Osobennosti problemy «obezvrezhivaniya» radioaktivnykh kontsentratsiy atomnykh elektrostantsiy i puti yeye resheniya [Specific aspects associated with the challenge of radioactive concentrate “neutralization” at nuclear power plants and ways to address it]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) — Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2011, no. 10 (36), pp. 32–38.

35. Savkin A. E. Sovershenstvovaniye tekhnologii ochistki kubovykh ostatkov Kol'koy AES ot radionuklidov [Further improvement of a method used to treat distillation residues from radionuclides at the Kolskaya NPP]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: materialovedeniye i novyye materialy — Issues of Atomic Science and Technology. Series: Materials Science and New Materials*, 2020, no. 4 (105), pp. 51–59.

36. Dmitriev S. A., Lifanov S. A., Nechaev A. F., Savkin A. E., Chechel'nitskiy G. M., Chugunov A. S., Shibkov S. N. *Sposob pererabotki zhidkikh otkhodov, sodержashchikh radionuklidy* [Method designed to process liquid waste containing radionuclides]. *Patent RF no. 2122753*. Applicant LLP “Laboratory of water treatment technologies — Science Ltd.”; application date: 30.10.1997; publication date: 27.11.1998. Patent bulletin, 1998, no. 33.

37. Mukhlenov I. P., Gorshtein A. E., Tumarkin E. S. *Osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Fundamentals

of the chemical technology]. Ed. I. P. Mukhlenov. 4th ed., Rev. and add. Moscow, Vishaya Shkola Publ., 1991. 463 p.

38. Onufrienko S. V. *Obrashcheniye s zhidkimi radioaktivnymi otkhodami v proyektakh AES novogo pokoleniya s reaktorom VVER* [Liquid radioactive waste management at nuclear power plants with WWER reactor units of a new generation]. Cand. techn. sci. diss. Saint-Petersburg, JSC “SPbAEP” Publ., 2002. 146 p.

39. *Ionoobmennyye smoly. Fenol'nyye smoly* [Ion exchange resins. Phenolic resins]. Tokem Company. URL: <https://www.token.ru/>, accessed on 01.06.2021.

40. Nechaev A. F., Chugunov A. S., Stepanov E. A. Modernizatsiya tekhnologicheskoy platformy glubokoy pererabotki radioaktivnykh otkhodov [Upgrading the technological platform for deep radioactive waste processing]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) — Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2010, no. 8 (34), pp. 66–70.

41. *Materialy obosnovaniya litsenzii na osushchestvleniye deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Razmeshcheniye energobloka № 4 Leningradskoy AES-2 OAO “Kontsern Energoatom”* [License application for activities in the field of atomic energy use. Siting of power unit No. 4 of the Leningrad NPP-2 operated by OJSC Concern Energoatom]. URL: http://www.greenworld.org.ru/?q=laes-2_14211, accessed on 04.07.2021.

Information about the authors

Chugunov Aleksandr Sergeevich, candidate of chemical sciences, senior researcher of the department of engineering radioecology and radiochemical technology, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190013, Russia), e-mail: tchugunov@mail.ru.

Vinnitskii Vadim Aleksandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of engineering radioecology and radiochemical technology, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190013, Russia), e-mail: ivinnicciy@gmail.com.

Bibliographic description

Chugunov A. S., Vinnitskii V. A. Local Systems Enabling the Concept of Separate Collection and Processing of Liquid Radioactive Medium at NPP with WWER Reactor Units. *Radioactive Waste*, 2021, no.4(17), pp. 44–56. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-44-56. (In Russian).