

УДК 544.726:621.039.735:66.081

ПРИЧИНЫ И ОЖИДАЕМЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАДИГМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ОТХОДАМИ АЭС

В.А. Винницкий,
А.Ф. Нечаев, А.С. Чугунов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Показано, что введение в действие ФЗ 190 «Об обращении с радиоактивными отходами» кардинально меняет базовую философию обращения с отходами АЭС, что в свою очередь активизирует задачу по модернизации системы и технологий обращения с РАО. В докладе представлены способы совершенствования технологической платформы обращения с РАО, в том числе, не требующие радикальной ревизии существующих проектных решений и высоких материальных затрат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ФЗ 190, жидкие радиоактивные отходы, АЭС с ВВЭР, система регенерации борной кислоты, карбоксильный катионит, сорбционно-мембранная установка.

На этапе становления атомной энергетики в отсутствие критериев приемлемости, лицензированных пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО) и законодательно подкрепленных директив по заключительной стадии их жизненного цикла единственная, по существу, задача проектных и эксплуатирующих организаций состояла в создании условий безопасного компактного хранения отходов АЭС на промышленных площадках, а основным критерием оценки эффективности принятой на АЭС стратегии обращения с РАО до недавнего времени была устойчивая эксплуатация атомных энергоблоков в течение проектного срока их службы.

Следует признать, что в целом эта задача решена успешно. Во всяком случае, за всю историю развития отечественной атомной энергетики, которая насчитывает около 1240 реакторо-лет, ни один блок АЭС не был остановлен, даже временно, из-за проблем, связанных с радиоактивными отходами. В немалой степени этому способствовало постепенное, эволюционное совершенствование общей схемы управления отходами на АЭС. Так, в частности, с начала 2000-х годов в

THE REASONS FOR AND EXPECTED CONSEQUENCES OF ALTERATION IN NPP'S RADWASTE MANAGEMENT PARADIGM

V.A. VINNITSKII,
A.F. NECHAEV, A.S. CHUGUNOV

It is shown that the introduction of the Federal Law №190 fundamentally changes the basic philosophy of NPP's waste management, what, in turn, promotes modernization of radwaste management system and technologies. This report presents some methods for improvement of technological platform for radwaste management, including those that do not require a radical revision of the existing design solutions.

KEYWORDS: Federal Law; liquid radioactive waste; NPP with WWER, boric acid regeneration system, carboxyl cation exchanger, sorption-membrane unit.

России планомерно осуществляется программа оснащения АЭС комплексами по сортировке, переработке и кондиционированию РАО [15] с целью сокращения объема накопленных отходов. За счет повышения уровня культуры эксплуатации существенно снижены и темпы генерации радиоактивных отходов [14].

Однако принятие закона №190-ФЗ [20], введение в действие пакета подзаконных актов [10–12, 16], формирование организационной и технологической инфраструктуры захоронения РАО [7, 19], законодательное ограничение сроков промежуточного хранения отходов [5, 20] и активизация вывода энергоблоков из эксплуатации кардинально меняют (должны изменить) базовую философию обращения с отходами АЭС.

Теперь, когда все РАО подлежат обязательному захоронению [20], их длительное, сопоставимое со сроком службы АЭС хранение на промплощадке не только не является объективно предопределенным условием, но конфликтует с требованием закона [5, 20]. Основной задачей «производителя» РАО становится своевременная (определяемая сроком промежу-

точного хранения), качественная (соответствующая критериям приемлемости [10]) подготовка отходов к окончательной изоляции с наименьшими рисками и затратами. В свете решения этой задачи принятая на АЭС технология переработки РАО (подготовка отходов к долговременному компактному хранению) теряет актуальность и, более того – может стать серьезным барьером на пути достижения определенных законом целей.

К примеру, размещение битумных компаундов в стационарных каньонах-хранилищах большой (до 25000 м³) емкости являлось оптимальной технологией при длительном хранении РАО на площадке АЭС. Но теперь извлечение этих изначально пожаро- и взрывоопасных отходов, подвергнутых, к тому же, радиолизу и, весьма вероятно, частичному нитрованию, сопряжено с существенными дополнительными рисками и затратами. Упаривание смешанных солевых потоков (отработанных дезактивационных композиций, регенерационных растворов систем спецводоочистки, промывных вод парогенераторов, отходов спецрачечных) позволило успешно и сравнительно просто решить задачу хранения на территории АЭС жидких РАО, образующихся в течение всего проектного срока службы энергоблоков. Но «состаренные» кубовые остатки выпарных аппаратов неприемлемы для захоронения без дополнительной, достаточно сложной, трудоемкой и высокозатратной переработки [6, 13, 18].

Анализ вышеизложенных фактов и законодательных предписаний закономерно приводит к заключению о необходимости (или, по меньшей мере – практической целесообразности) изменения парадигмы обращения с радиоактивными отходами на АЭС. А именно: все виды административной и эксплуатационной деятельности по обращению с РАО следует планировать и осуществлять так, чтобы любая технологическая операция и/или управленческое решение были преимущественно ориентированы на подготовку отходов к окончательной изоляции, а результаты их выполнения соответствовали критериям приемлемости РАО для захоронения настолько полно, насколько это разумно достижимо.

Перспективность такого подхода была очевидна и до принятия закона [20]. Так, еще в конце 1990-х годов концерн Росэнергоатом сформулировал концепцию разделения потоков ЖРО водо-водяных энергоблоков АЭС с выделением и последующим рециклом борной кислоты и нитратов. Реализация этой концепции позволила бы радикально сократить объем радиоактивных концентратов и оптимизировать их химический состав, существенно упростив технологию подготовки отходов к окончательной изоляции. Однако на практике концепция раздельной переработки ЖРО так и не была воплощена.

Между тем, состояние научных разработок [4, 22, 23], положительный опыт использования ряда

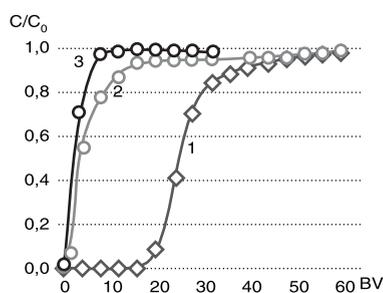
достижений науки и техники на практике, а также коммерческая доступность широкого спектра новых перспективных материалов и устройств позволяют утверждать, что модернизация технологической платформы обращения с отходами является вполне решаемой задачей даже на действующих энергоблоках АЭС.

Так, к примеру, замена в системах очистки борной кислоты (СВО-6) ОН-формы штатного анионита АВ-17 на солевую [1, 2] или применение в качестве фильтрующей загрузки пока не используемых, но официально разрешенных к применению на АЭС слабоосновных анионитов типа Purolite A100 [3] позволяет сократить «паразитную» сорбцию боратов не менее чем на порядок (рис. 1). За счет этого при прочих равных условиях:

- объем кубовых остатков выпарных аппаратов снижается в ~2,5 раза;
- существенно повышается их совместимость с цементной матрицей;
- при повторной переработке радиоактивных концентратов резко повышается эффективность осадительных и ионообменных процессов за счет снижения вероятности образования в растворах комплексов (ионных пар) поливалентных катионов, включая ⁶⁰Со и ⁹⁰Sr, с тетрагидроксоборат ионами [21, 24].

Имеет, по-видимому, смысл подчеркнуть, что эти очевидные преимущества могут быть достигнуты без изменения используемой с 1960-х годов технологической схемы обращения с ЖРО на АЭС с ВВЭР.

Применение в качестве загрузки предвключенных фильтров систем спецводоочистки слабодиссоциирующих катионитов позволит селективно и с высокой эффективностью извлекать из водных потоков АЭС соли лития, калия, аммиака и моноэтаноламина [25] (табл. 1). Регенерация этих ионообменных материалов, в отличие от сульфокатионитов, может осуществляться в т.н. голодном режиме (моль кислоты на моль



1 - OH⁻ - B(OH)₃ 2 - HCO₃⁻ - B(OH)₃ 3 - FB - B(OH)₃

РИС. 1.

Эффективность сорбции борной кислоты различными формами анионита АВ-17×8 (кривая 1, 2) и FB-формой низкоосновного анионита Purolite A100 (кривая 3). C – концентрация в фильтрате, C₀ – исходная концентрация (0,1M), BV – количество колоночных объемов смолы

сорбированных ионов), что приводит к кратному снижению объема вторичных отходов. Причем, есть основания считать [25], что удельная активность вторичных отходов будет ниже предельных, нормируемых [16] значений. Удаление «балластных» солей на предвключенном фильтре, кроме того, резко увеличит ресурс работы штатных сульфокатионитов и, соответственно – концентрацию радионуклидов в смоле. В этих условиях целенаправленный подбор состава регенерирующего раствора позволяет, в принципе, получать труднорастворимые, минералоподобные радиоактивные осадки, пригодные для захоронения, непосредственно в процессе восстановления исходных свойств отработавших ионитов [8].

Таким образом, использование в системах СВО и БОУ предвключенных фильтров на основе слабokислотных катионитов мотивируется не только возможностью снижения в кубовых остатках концентрации щелочных металлов (которая достигает 30–38% масс.), но повышением эффективной обменной емкости штатных сульфокатионитов и перспективой перевода ЖРО в форму, пригодную для захоронения, на стадии регенерации катионообменных смол [25]. Эти меры не требуют ревизии существующих проектных решений, но их применение могло бы кратко сократить затраты на подготовку РАО к окончательной изоляции.

В том же контексте следует рассматривать отказ от практикуемого в настоящее время смешения и совместного упаривания всех солевых потоков АЭС. Сбор условно чистых по радионуклидам вод промывки парогенераторов в отдельные емкости (что не противоречит требованиям [17]) позволит:

- выделить фракцию химических отходов, захоронение которых не регламентируется законом [20];
- сократить объем радиоактивных концентратов (промывка каждого парогенератора сопровождается образованием до 250 м³ раствора, содержащего около 2 т оксидов железа и меди);
- сократить поступление в кубовые остатки выпарных аппаратов органических комплексообразователей (ЭДТА, ацетата и цитрата аммония), содержание которых в отходах нормируется [10] и которые серьезно усложняют технологию переработки концентратов на этапе их подготовки к захоронению.

Этот подход – раздельные сбор и переработка

потоков – является абсолютно предпочтительным и в отношении содержащих высокую концентрацию СПАВ отходов спецпрачечных.

Применение сорбционно-мембранной схемы переработки низкосолевых отходов, включающей в себя параллельное Н⁺-ОН⁻ ионирование раствора с концентрированием фильтратов в баромембранном аппарате, циркуляцией концентратов через приемную емкость и финишной доочисткой отходов гиперфильтрацией (рис. 2) позволило [9]:

- обеспечить эффективное выведение из потока не только катионов и анионов, но и анионных комплексов поливалентных металлов;
- сократить объем ЖРО в 600 раз при удельной активности очищенной воды по сумме β-излучающих радионуклидов менее 1,5 Бк/дм³.

Обобщение вышеизложенного логично приводит к следующим заключениям:

1) операции, связанные с выводом АЭС из эксплуатации, а также введение в действие пакета законодательных и нормативных актов, регулирующих обращение с радиоактивными отходами, актуализировали сравнительно давно обсуждаемую задачу совершенствования системы управления РАО на АЭС как в методологическом, так и в технологическом плане;

2) основной целью модернизационного проекта является изменение общей схемы и конкретных технологических решений по обращению с эксплуатационными отходами так, чтобы обеспечить соответствие РАО критериям приемлемости для захоронения с наименьшими, разумно достижимыми рисками и затратами;

3) состояние научных разработок в сфере обращения с РАО, положительный опыт использования ряда достижений науки и техники на практике, а также коммерческая доступность широкого спектра новых перспективных материалов и устройств, позволяют утверждать, что необходимые условия модернизации в основном сформированы.

Тот факт, что до сих пор обсуждаемые здесь либо какие-то другие способы совершенствования технологической платформы обращения с РАО не нашли практического воплощения на эксплуатируемых АЭС, если и не оправдан, то, по меньшей мере, объясним. Но то, что после двадцати лет дискуссий о необходимости модернизации технологии и о масштабах

ТАБЛИЦА 1.

Результаты определения динамической обменной емкости карбоксильных катионитов

Титрант	Положение скачка «титрования» (экв/м ³) при деалкализации растворов					
	С-115	С-104	С-106	Relite CND	CWP-1	Токем-200
NaOH/NaCl	1400	2560	1570	2960	2410	2140
NH ₃ /NH ₄ Cl	1840	2740	1690	3350	2550	2320
МЭА/МЭА·НСl	1130	2720	1650	2290	2270	2030

**ФИЛОСОФИЯ ОБРАЩЕНИЯ
С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ:
ПЛЮСЫ И МИНУСЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ
И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

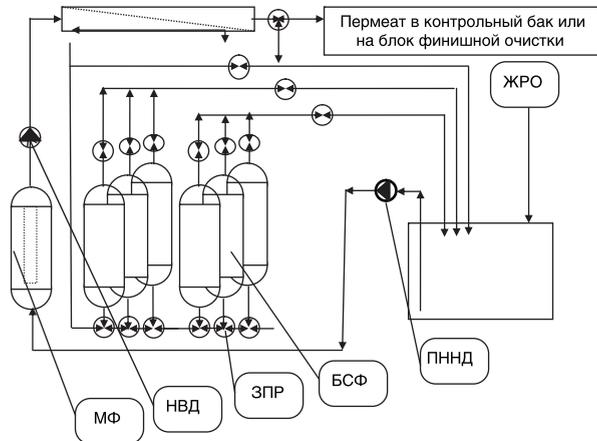


Рис. 2.

Принципиальная схема сорбционно-мембранной установки для переработки ЖРО (МФ – механический фильтр; БСФ – блоки сорбционных фильтров; ПННД – питательный насос низкого давления; НВД – насос высокого давления; ЗПР – запорно-регулирующая арматура)

экономической нагрузки в случае непринятия должных мер решения полувековой давности практически без изменений продолжают штамповаться в проектах новых АЭС, вынуждает задуматься об эффективности стратегического планирования и оперативного управления в сфере обращения с РАО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винницкий В.А., Нечаев А.Ф., Чугунов А.С. Динамика сорбции борной кислоты различными формами высокоосновного анионита АВ-17-8 и минимизация ее потерь в технологическом цикле АЭС // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2013. №20(46). С. 81–84.
2. Винницкий В.А., Чугунов А.С., Нечаев А.Ф. Сорбция борной кислоты гидроксильной формой высокоосновного анионита АВ-17-8 и направление модернизации систем спецводоочистки АЭС // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. №6(146). С. 84–87.
3. Винницкий В.А., Чугунов А.С., Нечаев А.Ф. Оптимизация системы обработки борсодержащих вод на АЭС – средство минимизации объема РАО // Тез. докл. научно-технической конференции «Команда-2015». СПб: СПбПУ, 2015. С. 73–74.
4. Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А., Нечаев А.Ф. и др. Способ переработки жидких отходов, содержащих радионуклиды. Патент РФ 2122753. Оpubл. БН №21, 1998.
5. Комментарий к Федеральному закону «Об обращении с радиоактивными отходами». М.: Изд. ГД РФ, 2014. 207 с.
6. Методические указания по укрупненной оценке стоимости работ по обращению с РАО (Приложение №3 к приказу ГК «Росатом» от 08.12.2011 №1/10-

В.А. ВИННИЦКИЙ, А.Ф. НЕЧАЕВ, А.С. ЧУГУНОВ
ПРИЧИНЫ И ОЖИДАЕМЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ
ПАРАДИГМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ
ОТХОДАМИ АЭС

- 61-П). М.: ГК «Росатом». 2011. 22 с.
7. Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами. Распоряжение Правительства РФ №384-Р от 20.03.2012.
8. Нечаев А.Ф., Чугунов А.С. Мотивация и возможности сокращения объема радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 6. С. 318–322.
9. Нечаев А.Ф., Чугунов А.С., Степанов Е.А. Модернизация технологической платформы глубокой переработки радиоактивных отходов // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2010. №8(34). С. 66–70.
10. НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения». Утверждены приказом Ростехнадзора №572 от 15.12.2015 (зарегистрированы Минюстом 27.03.2015 №36592).
11. «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». Постановление Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 (Собрание законодательства РФ, 29.10.2012. №44. Ст. 6017).
12. «О порядке государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов». Постановление Правительства РФ №1249 от 03.12.2012 (Собрание законодательства РФ, 10.12.2012. №50. Ст. 7067).
13. Омельчук В.В., Стахив М.Р., Савкин А.Е. и др. Разработка технологии переработки кубовых остатков на Кольской АЭС // Безопасность окружающей среды. 2007. № 3. С. 34–37.
14. Резник А.А., Корчагин Ю.П., Арефьев Е.К. Обращение с радиоактивными отходами на АЭС концерна «Росэнергоатом» // Труды 6-ой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (21–23 апреля 2008 г., Москва). М.: Росэнергоатом, 2008. С. 827–831.
15. Сорокин Н.М., Аркадов Г.В. Опыт эксплуатации АЭС России и задачи на ближайшую перспективу // Труды 5-ой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (19–21 апреля 2006 г., Москва). М.: Росэнергоатом, 2006. С. 7–19.
16. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности». В редакции изменений №1, утверждены Постановлением №43 от 16.09.2013, зарегистрированы Минюстом РФ 15.10.2013. №30309.
17. СП 2.6.6.1168-02 «Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами» (СПОРО-2002). В редакции изменений №2, утверждены Постановлением №43 от 16.09.13, зарегистрированы Минюстом РФ 15.10.2013. №30309.

18. «Тарифы на захоронение радиоактивных отходов на первый период регулирования». Приложение к приказу Минприроды России №89 от 19.03.2013.
19. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации». Постановление Правительства РФ №444 от 13.07.2007. №1248 от 19.11.2015.
20. Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №190-ФЗ от 11.07.2011 (Собрание законодательства РФ, 18.07.2011, №29. Ст. 4281).
21. **Чугунов А.С., Винницкий В.А., Нечаев А.Ф.** Роль слабых лигандов в процессах глубокой дезактивации ЖРО // Тезисы докл. VIII Всероссийской конференции по радиохимии (28.09-02.10.2015, Железногорск). Железногорск: Изд. ГХК, 2015. С. 343.
22. **Чугунов А.С., Нечаев А.Ф.** Особенности проблемы «обезвреживания» радиоактивных концентратов атомных электростанций и пути ее решения // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2011. №10 (36). С. 32–38.
23. **Чугунов А.С., Нечаев А.Ф., Дмитриев А.С. и др.** Переработка высокосолевых борсодержащих жидких радиоактивных отходов // Вопросы материаловедения. 1997. № 5(11). С. 15–21.
24. **Чугунов А.С., Румянцев А.В., Винницкий В.А., Нечаев А.Ф.** Влияние неорганических лигандов на эффективность ионообменной переработки радиоактивных отходов // Изв. ВУЗов. Ядерная энергетика. 2015. №1. С. 119–127.
25. **CHUGUNOV A.S., NECHAEV A.F.** Potential use of carboxyl ion-exchangers for operational optimization of special water purification systems in NPP with VVER // Atomic energy. 2015. Vol. 118. N 4. P. 285–289.

Винницкий Вадим Александрович, аспирант кафедры инженерной радиозологии и радиохимической технологии Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет),

✉ e-mail: ivinnicciy@me.com

Нечаев Александр Федорович, д.х.н., профессор кафедры инженерной радиозологии и радиохимической технологии Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет),

✉ e-mail: a-nechaev@lti-gti.ru

Чугунов Александр Сергеевич, к.х.н., старший научный сотрудник кафедры инженерной радиозологии и радиохимической технологии Санкт-Петербургского государственного технологического институт (технический университет),

✉ e-mail: tchugunov@mail.ru

✉ 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26