DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98 УДК: 621.039.73

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ АЭС

Р. А. Пензин[1], А. А. Свитцов[2]

[1]**ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», Москва**
[2]**РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва**

Статья поступила в редакцию 26 августа 2020 г.

В статье приведены результаты технико-экономического анализа использования двух методов переработки кубовых остатков, образующихся при выпаривании жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на АЭС, — глубокого упаривания (УГУ) и ион-селективной очистки (УИСО). Показано, что метод УИСО значительно более эффективен и менее затратен, чем УГУ, поскольку кардинально снижается объем передаваемых на захоронение кондиционированных РАО. Рассмотрены также возможные методы модернизации отдельных стадий УИСО. Даны рекомендации по изменению технологии обращения с ЖРО на АЭС нового поколения, включающие раздельный сбор основных типов ЖРО и создание локальных схем их переработки и кондиционирования.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, АЭС, кубовые остатки, метод глубокого упаривания, метод ион-селективной очистки, эксплуатационные расходы.*

Проблемы переработки радиоактивных отходов (РАО), наряду с безопасностью самих ядерных технологий, всегда были ключевыми и во многом определяли перспективы дальнейшего развития атомной промышленности. На всех российских АЭС действует практически идентичная аппаратурно-технологическая схема переработки образующихся при эксплуатации жидких радиоактивных отходов (ЖРО), разработанная еще в 60-х годах прошлого века [1]. В ее основе лежат выпарные технологии. Образующиеся из различных источников ЖРО (регенераты ионообменных смол, дезактивационные растворы, сточные воды спецпрачечных и др.) поступают в единую систему сбора трапных вод и затем направляются на выпарные установки систем водоочистки (СВО), где они очищаются от радионуклидов с получением в качестве вторичного отхода солевого концентрата, так называемого кубового остатка (КО), имеющего солесодержание около 300 г/дм^3. С момента ввода в эксплуатацию 1-го блока Нововоронежской АЭС в 1964 году эта схема практически не менялась, а образующиеся КО вынужденно находятся в специально построенных хранилищах жидких радиоактивных отходов (ХЖО). К настоящему времени на российских АЭС накопилось около 90 тысяч кубометров КО, относящихся к категории САО, а на некоторых станциях емкости ХЖО заполнены на 85—90 % [2].

В течение ряда лет предпринимались попытки решить проблему переработки КО различным методами [3, 4]. В перечень таких методов можно включить битумирование КО, которое еще в 1986 году было реализовано на Ленинградской и Калининской АЭС. Этот метод не получил широкого распространения из-за ряда серьезных недостатков. При битумировании увеличивается пожароопасность отвержденных КО, которые необходимо хранить только на станционной площадке. В конечном итоге, перед тем как данные отходы будут вывезены с территории АЭС, их необходимо дополнительно подвергнуть окончательной переработке и кондиционированию.

Много лет в России разрабатывался метод цементирования КО, который с 1995 года стал внедряться на ряде станций. Достоинства его очевидны: негорючесть компаунда, простота оборудования, прочность и стойкость бетонного монолита. Однако при цементировании происходит значительное увеличение объема отходов, существуют ограничения по солесодержанию КО, необходим индивидуальный подбор вяжущего вещества и параметров процесса и строгое соблюдение рецептуры [4].

В 1987 году на Нововоронежской АЭС (НВ АЭС) была запущена первая установка глубокого упаривания КО (УГУ), которая позволяет осуществить финальное кондиционирование вторичных отходов. В результате ее работы на финише получается солевой плав (СП) с солесодержанием 1500—1800 г/дм^3, который, как и исходные ЖРО, относится к категории САО и содержит связанную, т. е. кристаллизационную, воду от 5 до 20 % [3]. Объем захораниваемых отходов, в сравнении с цементированием, при этом снижается в 6—8 раз.

Как показала практика долговременной работы установки УГУ-500 на НВ АЭС, ее реальная производительность оказалась намного ниже паспортной, которая предполагалась на уровне 0,5 м^3/ч [5]. Это обстоятельство приходится учитывать при дальнейшем использовании метода глубокого упаривания. К настоящему времени, когда уже около 5 лет идет процесс вывода из эксплуатации блоков № 1 и № 2 НВ АЭС, в заглубленных емкостях ХЖО остается большое количество таких отходов: в жидком виде — около 2000 м^3 ЖРО, а в виде кристаллогидратов (КГ) — около 1700 м^3 [5]. За время длительного хранения изотопный состав отходов изменился, и в настоящее время они представляют собой отходы категории САО 3-го класса с преобладанием радионуклидов ^{137}Cs (более 95 %) и остаточным содержанием ^{60}Co.

Естественно, что наличие такого большого количества КО, которых на этапе вывода из эксплуатации по варианту «немедленный демонтаж» вообще не должно быть на площадке АЭС, значительно усложняет эксплуатацию давно исчерпавших свой ресурс штатных систем переработки ЖРО. Усугубляет ситуацию и нерешенность проблемы извлечения КО из заглубленных емкостей ХЖО. Совокупность этих факторов может значительно усложнить все работы по выводу из эксплуатации блоков № 1 и № 2 НВ АЭС и затруднить выполнение намеченных АО «Концерн «Росэнергоатом» графиков работ [6].

В 1999 г. для очистки КО было предложено использовать метод селективной очистки [7], а с 2006 г. на Кольской АЭС функционирует первая в РФ установка ион-селективной очистки (УИСО), созданная по проекту ЗАО «РАОТЕХ» [8].

Главное преимущество метода УИСО заключается в резком уменьшении объема захораниваемых отходов категории САО — в 100 и более раз. Это достигается за счет селективного выделения радионуклидов из общей массы балластных солей: ^{137}Cs поглощается в фильтр-контейнерах (ФК) селективным ферроцианидным сорбентом, а ^{60}Co после разрушения его комплекса с ЭДТА и другими комплексонами в щелочной среде в виде микрокристаллов гидроокиси поглощается на микрофильтрах (МФ) с керамическими пористыми мембранами. Образовавшийся на предварительной стадии очистки шлам и сами микрофильтры затем цементируются в контейнерах НЗК 150-1,5П и вместе с ФК, обладающими необходимой степенью защиты, после осушения сорбентов в них до содержания свободной влаги менее 3 % направляются на захоронение как полностью кондиционированные вторичные ТРО.

С 2015 г. такой комплекс переработки ЖРО работает и на Смоленской АЭС, аналогичные комплексы строятся еще на трех отечественных станциях.

Рассмотрим подробнее технико-экономические показатели двух методов кондиционирования КО (с помощью УГУ и УИСО) применительно к переработке ЖРО, накопленных на блоках № 1 и № 2 НВ АЭС. Принципиальные блок-схемы этих двух технологий представлены на рис. 1.

Первый этап, общий для двух методов, должен включать в себя изъятие из ХЖО как жидкой фракции КО, так и находящихся там КГ и их последующее растворение в емкостях кубовых остатков (ЕКО). Эти операции в данной работе не рассматриваются, т. к. они требуют специального решения [6]. Затем образовавшийся раствор перекачивают в промежуточную емкость (ПЕ). После растворения КГ и усреднения состава хранящихся в ХЖО КО до условного солесодержания 300 г/дм^3 их суммарное количество будет составлять около 11 500 м^3 [5]. Именно для этого объема ЖРО и будет далее проведена оценка

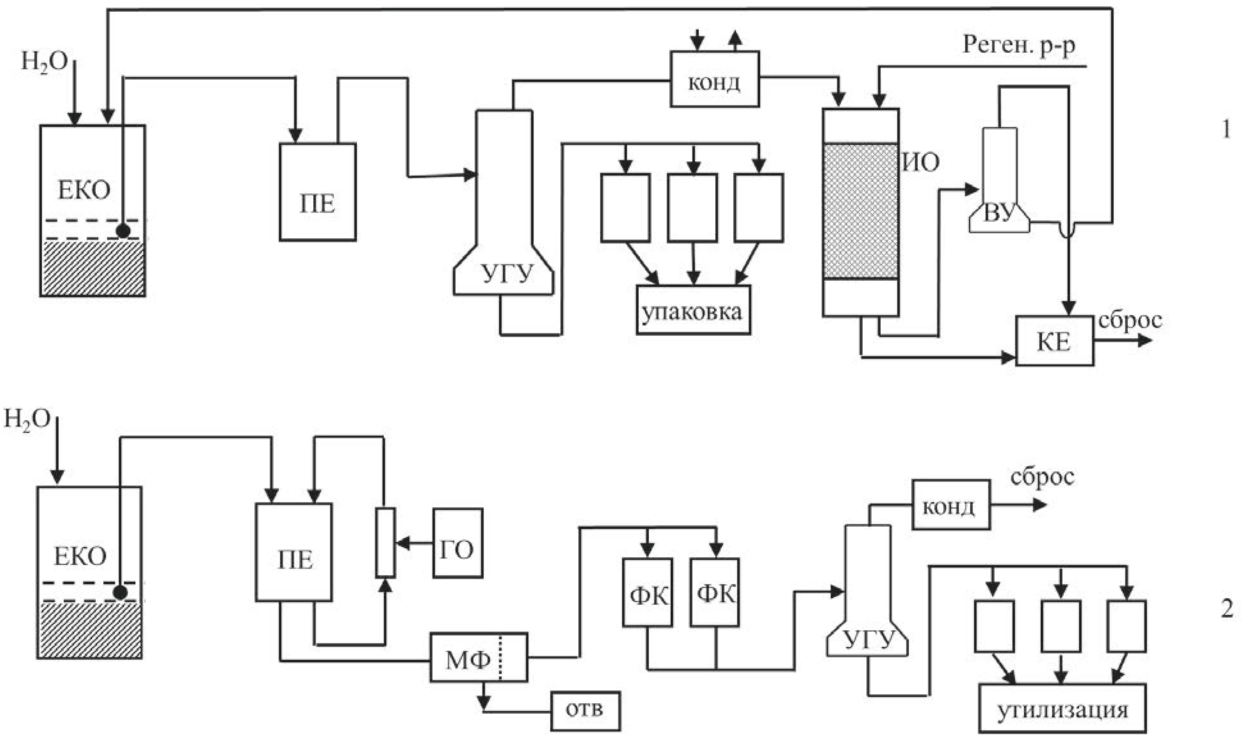

Рис. 1. Блок-схемы способа глубокого упаривания (1) и способа ион-селективной очистки (2) кубовых остатков

затрат на их переработку вышеприведенными методами.

По первому способу образовавшиеся КО из емкости ПЕ сразу направляют на установку глубокого упаривания УГУ-500. Полученный СП разливают в специальные бочки типа А2201 по 0,2 м^3 (первичные упаковки), а после охлаждения и кристаллизации эти упаковки по 4 штуки размещают в невозвратные защитные контейнеры типа НЗК 150-1,5П. Именно эти НЗК будут являться конечными упаковками, направляемыми на захоронение. Вторичный пар конденсируют и подают на очистку в фильтры ионного обмена (ИО), очищенную воду через контрольную емкость (КЕ) сбрасывают. Для сокращения водопотребления ее можно повторно использовать для размыва в ЕКО. Регенераты ионного обмена, а также промывные воды сбрасывают в трап спецканализации, упаривают на штатных аппаратах ВУ установок СВО, и далее они поступают на повторную переработку.

По технологии УИСО промежуточная емкость ПЕ используется как химический реактор, в который для окисления свободной органики и комплексов Со-ЭДТА подается озон из генератора озона (ГО). Основные этапы очистки ЖРО по данной технологии приведены выше. В конечном итоге в технологии УИСО образуется два основных типа кондиционированных отходов: НЗК 150-1,5П с цементированными шламами и МФ, а также отработанные ФК с селективным сорбентами. На финише почти полностью очищенный от радионуклидов раствор подают на установку глубокого упаривания, аналогичную УГУ-500. Полученный при этом СП категории ОНАО разливают в металлические бочки и охлаждают для кристаллизации.

Ниже приведен расчет эксплуатационных затрат на переработку 11 500 м^3 КО по этим двум технологиям.

При переработке КО с помощью УГУ-500 весь объем кондиционированных отходов будет относиться к категории САО. Сначала на установке получают около 2 300 м^3 СП категории САО с концентрацией около 1 500 г/дм^3.

Количество специальных бочек А2201 объемом 0,2 м^3 для упаковки такого количества СП со степенью заполнения 0,9 составит 12 800 шт.

Количество контейнеров НЗК 150-1,5П при размещении в каждом по 4 бочки составит 3 200 шт.

С учетом габаритного объема НЗК 150-1,5П — 3,74 м^3, общий объем образующихся при переработке КО по данной схеме вторичных захораниваемых ТРО категории САО составит около 12 000 м^3 (3 200×3,74), т. е. по факту будет сопоставим и даже несколько превышать объем исходных ЖРО.

По второму методу с использованием УИСО при переработке будут образовываться две категории отходов: САО и ОНАО.

При расчете общего объема отходов категории САО примем во внимание, что при поглощении радионуклидов цезия ферроцианидным сорбентом степень его насыщения не должна превышать половины от допустимой максимальной удельной активности отходов 3 класса категории САО в упаковке [9]. При таком допущении его удельная активность будет составлять $5 \cdot 10^9$ Бк/кг (при максимально допустимых $1 \cdot 10^{10}$ Бк/кг). С учетом того, что полезный объем сорбента в ФК конструкции ЗАО «РАОТЕХ» составляет 120 дм^3, при заданных условиях через один ФК может быть пропущено 144 м^3 ЖРО. Таким образом, всего для очистки 11 500 м^3 КО понадобится 80 ФК, которые после отработки своего ресурса будут относиться к САО.

Для захоронения цементированного шлама и МФ понадобится 150 контейнеров НЗК150-1,5П, что составит 560 м^3 отходов категории САО.

С учетом того, что габаритный объем ФК равен 0,6 м^3, общий захораниваемый объем 80 ФК составит около 50 м^3, а общий объем всех кондиционированных отходов 3 класса категории САО при использовании метода УИСО — около 610 м^3.

Получаемый по технологии УИСО на финишной стадии СП будет иметь удельную активность 0,5—0,6 кБк/кг. В соответствии с нормами [10] он будет относиться к ОНАО и может быть упакован в обычные металлические бочки. Их потребуется около 12 000 штук, а значит, общий объем отходов категории ОНАО составит 2400 м^3.

В табл. 1 представлены результаты расчета величин эксплуатационных затрат по этим двум методам переработки. Цены на упаковки и стоимость услуг определены с учетом рекомендаций и данных [3, 10—12].

Таблица 1. Общие эксплуатационные затраты на обращение с КО на блоках № 1 и № 2 НВ АЭС

Наименование статей затрат	Цена единицы, млн руб.	Затраты, млн руб.	
		УИСО	УГУ
Переработка	–	800	500
Спец. бочки А2201	0,10	–	1 280
Контейнеры НЗК	0,15	22	480
Фильтр-контейнеры	1,25	100	–
Бочки металлические	0,003	36	–
Транспортировка	–	5	60
Захоронение САО	0,158/м^3	97	1 900
Захоронение ОНАО*	0,025/м^3	60	–
ИТОГО		Около 1 124	Около 4 200

*Следует отметить, что порядок обращения с отходами категории ОНАО, включая стоимость их возможного захоронения в приповерхностных могильниках, в РФ пока еще не урегулирован [10–12]. В [10] указаны только общие принципы обращения с такого рода отходами, а в [11] отсутствуют ценовые показатели на их утилизацию. Поэтому при расчете мы воспользовались рекомендациями публикации [12], где со ссылкой на мировую практику указано, что стоимость захоронения отходов категории ОНАО должна быть в 5–10 раз ниже, чем для отходов НАО.

Для сравнения можно привести затраты при использовании метода цементирования КО в количестве 11 500 м^3. В этом случае произойдет увеличение первоначального объема примерно в 1,7 раза и образование примерно 20 000 м^3 цементного компаунда. Потребность в контейнерах НЗК150-1,5П при этом составит 13 400 шт., затраты на их приобретение — 2,0 млрд руб., а стоимость захоронения 50000 м^3 отходов категории САО — около 7,9 млрд руб. Итого совокупные затраты при использовании цементирования только по этим двум статьям расходов будут более чем в 2 раза выше метода УГУ и в 8 раз больше, чем при использовании УИСО.

При всей относительности вышеприведенных стоимостных расчетов очевидно, что выигрыш в совокупных затратах при использовании метода УИСО практически полностью определяется кардинальным снижением объема захораниваемых отходов категории САО.

Несмотря на то, что в своей основе УИСО имеет несомненные преимущества перед другими методами кондиционирования ЖРО, опыт эксплуатации данной установки на Кольской АЭС [8] выявил некоторые проблемы, связанные с нестабильностью работы на отдельных технологических стадиях, и прежде всего на стадии озонового окисления исходных растворов. Уже в самом начале эксплуатации УИСО на Кольской АЭС была проведена замена нестабильно работающего отечественного генератора озона на аппарат немецкой фирмы VEDEKO, а также была усовершенствована система эжекторного ввода озона в реакционную смесь [8].

Но, несмотря на эти изменения, стадия окисления по-прежнему остается самой проблемной в данной технологии из-за частичного окисления органических компонентов КО [13], что мешает полному выделению ^{60}Co на стадии микрофильтрации. Именно повышенное содержание ^{60}Co в полученном на конечной стадии СП в итоге и определяет его остаточную радиоактивность и не позволяет, в соответствии с положениями [10], отнести этот продукт к категории общепромышленных отходов. Поэтому сегодня на всех АЭС, где функционирует УИСО, полученный СП категории ОНАО вынуждены временно хранить в бочках на станционной площадке.

Очевидно, что дальнейшее совершенствование данного метода может способствовать созданию более современной и эффективной технологии обращения с накопившимися КО на всех АЭС.

Эти цели могут быть достигнуты различными путями. Прежде всего целесообразно добиться повышения эффективности окисления органики в КО. Решать задачу можно как повышением концентрации озона в воде, которая очень низка [13], так и повышением окислительной способности самого процесса озонирования.

Для первого решения можно использовать принципиально новые сверхзвуковые парогазожидкостные эжекторы, которые показывают в экспериментах двукратное повышение концентрации растворенного в воде озона и соответствующее ускорение реакции окисления [14]. Второе решение может быть достигнуто с помощью комбинированной технологии озонового окисления, интенсифицируемого различными физическими процессами, например электромагнитным излучением [15].

Наиболее же кардинальным путем в этом направлении является принципиальное изменение технологии обращения с очищенными от радионуклидов КО с помощью УИСО. Для этого на конечной стадии переработки их не надо концентрировать упариванием, а необходимо с помощью электромембранного метода разделить на отдельные компоненты. Используя аппарат с биполярными мембранами, можно будет получать непосредственно из солевых растворов азотную кислоту, смешанную калиево-натриевую щелочь и достаточно чистую борную кислоту [16]. Первые два продукта вполне возможно без дополнительной очистки повторно использовать на АЭС для регенерации ионитов в системах СВО и в цехе химводоподготовки, а борную кислоту необходимо подвергнуть дополнительной очистке и концентрированию. При таком подходе полностью исключается проблема пристанционного хранения СП категории ОНАО по причине его отсутствия.

На вновь возводимых блоках АЭС, согласно современной концепции АО «Концерн «Росэнергоатом», ХЖО для хранения КО вообще не предусмотрено. Этот подход впервые был претворен в жизнь при возведении 1-го блока НВ АЭС-2. При текущей эксплуатации таких блоков в образующихся «свежих» ЖРО будут содержаться не только традиционные радионуклиды (^{137}Cs, ^{90}Sr и ^{60}Co), но и изотопы таких элементов, как Mn, Sb, Cr и др. [17], причем их удельная активность может даже превышать активность цезия и кобальта. Поэтому и метод УИСО, который изначально был предназначен для переработки «выдержанных» КО, не может справиться с очисткой таких ЖРО. Это вполне очевидно, так как термин «селективная очистка» имеет смысл только в том случае, если речь идет о двух-трех изотопах, а не о целой гамме элементов.

В связи с этими новыми задачами целесообразно рассмотреть другой подход к организации системы обращения с ЖРО на АЭС. В его основе должна быть заложена концепция раздельного сбора различных типов ЖРО с последующим созданием замкнутых схем их раздельной переработки. Сегодня существует ряд предпосылок для таких решений, которые при их дальнейшем развитии и внедрении позволят значительно повысить надежность и снизить затраты на переработку ЖРО.

Одним из примеров такой локальной схемы переработки ЖРО является уже внедренная на ряде зарубежных АЭС разработка фирмы AREVA [18]. Она предназначена для очистки дезактивационных растворов в замкнутом цикле. При этом для самой внутриконтурной дезактивации вместо ЭДТА используются более мягкие органические кислоты, скорее всего, смеси щавелевой и муравьиной кислот, достаточно легко разлагаемые под действием УФО. На следующих стадиях, по аналогии с технологией УИСО, проводят отделение гидролизованных оксидов с помощью микрофильтрации и финишную очистку фильтрата с помощью ионообменных смол. Очищенная контурная вода подлежит возврату, а все вторичные ТРО в виде цементированного концентрата и отработанных ионообменных смол подлежат захоронению. Благодаря такому подходу полностью исключается попадание «тяжелых» комплексонов в трапные воды, а значит, и во все системы СВО. Очевидно, что внедрение аналогичной AREVA технологии применительно к переработке отдельных типов ЖРО не только упростит всю их дальнейшую очистку, но и принесет значительный экономический эффект.

В РФ фирмой ООО НПП «Александра-Плюс» в настоящее время создается инновационная технология погружной дезактивации с использованием жесткого ультразвука, включающая в себя и автономную установку переработки образующихся вторичных ЖРО [19]. В случае более широкого внедрения аналогичных [18, 19] процессов для всех типов дезрастворов, образующихся как при эксплуатации АЭС, так и при выводе их из эксплуатации, можно будет значительно упростить систему обращения с ЖРО.

Другим примером может быть проект по созданию автономной установки переработки регенерационных растворов ионообменных фильтров. Если учесть, что регенераты составляют не более 5% от общего количества образующихся на АЭС ЖРО, а в их составе содержится основное количество всех радионуклидов и большое количество балластных солей [1], то их локальная очистка позволит существенно сократить и капитальные, и эксплуатационные затраты. Опыт создания такой локальной установки «под ключ» по нашим данным отсутствует, однако перспективным для этих целей представляется комплексное использование электромембранных и выпарных методов [20, 21].

Заслуживает внимания и создание автономной системы переработки вод спецпрачечной. Эти специфические низкоактивные ЖРО составляют до 30 % всех образующихся на АЭС отходов, но из-за наличия большого количества ПАВ их упаривание весьма затруднено [1]. В локальной установке переработки ЖРО спецпрачечной можно использовать селективную сорбцию с наноразмерными частицами сорбента и мембранную ультрафильтрацию, что позволит не только полностью исключить попадание ПАВ в трапные воды, но и повторно использовать их в процессе дезактивации спецодежды [22].

Совершенно очевидно, что разделение на этапе сбора различных типов образующихся при эксплуатации АЭС жидких отходов с их последующей раздельной переработкой и кондиционированием позволит значительно снизить количество захораниваемых отходов. Такой подход был впервые в РФ использован в разработанной АО «ВНИИХТ» технологической схеме комплексной переработки ЖРО атомного флота, которая с 2000 г. работает на АО ЦС «Звездочка» в г. Северодвинске. Она позволила значительно сократить количество вторичных отходов и эксплуатационные затраты в сравнении со стандартной выпарной схемой их переработки [23].

Литература

1. *Рябчиков Б. Е.* Очистка жидких радиоактивных отходов. М. : ДеЛи принт, 2008. 512 с.

2. *Стахив М. Р.* Обращение с РАО на АЭС. ОАО «Концерн Росэнергоатом». Материалы КНТС, Москва, 8.10.2014, ВНИИАЭС.

3. *Сорокин В. Т.* Обоснование безопасности захоронения солевого плава, образующегося на установках глубокого упаривания АЭС // Радиоактивные отходы. 2019. № 2. С. 1—9.

4. *Захарова К. П., Химченко О. М., Суханов Л. П.* Разработка технологического режима цементирования солевых концентратов АЭС // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 5. С. 309—314.

5. *Пензин Р. А., Проскурина О. В. и др.* Технологические решения по оснащению комплекса, предназначенного для обращения с РАО при выводе из эксплуатации энергоблоков № 1 и № 2 НВ АЭС : Отчет о НИР / ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт» по договору № 314-ОДИЦ от 06.09.2018 с филиалом АО «Концерн «Росэнергоатом». ОДИЦ, 2018 г.

6. *Пензин Р. А., Проскурина О. В. и др.* Разработка технологической схемы по обращению с демонтированным оборудованием и радиоактивными отходами с учетом логистических связей при выводе из эксплуатации энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС по варианту «немедленный демонтаж»: Отчет о НИР/ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт» по договору № 314-ОДИЦ от 06.09.2018 с филиалом АО «Концерн «Росэнергоатом». ОДИЦ, 2019 г.

7. *Савкин А. Е.* Переработка кубовых остатков АЭС с использованием селективных сорбентов : Автореф. дисс… канд. техн. наук. — М., 1999. 24 с.

8. *Авезниязов С. В.* Опыт эксплуатации КП ЖРО Кольской АЭС. Доклад на КНТС — 2011, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

9. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

10. СП 2.6.62572-2010. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды. Утв. приказом Главного государственного санитарного врача РФ от 18 января 2010 г. № 4.

11. Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов классов 1, 2, 3, 4, 6 на период с 2018 по 2022 годы и тарифов на захоронение радиоактивных отходов класса 5 на 2018 год. Утв. приказом Федеральной антимонопольной службы от 28.12.2017 № 1812/17.

12. *Абалкина И. Л.* Опыт захоронения ОНАО: перспективы для России // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 15—23.

13. *Лагунова Ю. О.* Использование озона и перекиси водорода для окислительного разложения органических комплексонов в процессе очистки ЖРО : Автореф. дисс… канд. хим. наук. — М., 2012. 20 с.

14. *Алферов М. Я., Косс А. В., Пензин Р. А.* Патент РФ № 2209350, приор. от 02.09.2002.

15. *Басиев А. А., Хубецов С. Б.* Разработка ступенчатой технологии окисления органических комплексов кубовых остатков АЭС / В сб. докл. Межд. научно-технич. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК — 2018. М., ВНИИ АЭС, 2018. С. 248—258.

16. *Свитцов А. А., Демкин В. И., Салтыков Б. В.* Электромембранный метод утилизации солевых концентратов. / В сб. докл. 10-го Межд. водно-химического форума. М., МЭИ, 2017. С. 42—48.

17. *Mištová E. et al.* Selective Sorption of Sb(V) Oxoanion by Composite Sorbents based on Cerium

and Zirconium Hydrous Oxides // Ion Exchange Letters. 2008. No. 1. Pp. 4—6.
18. *Палатова С. В.* Исследования в области дезактивации материалов и оборудования при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС // Атомная техника за рубежом. 2018. № 3. С. 16—30.
19. *Лебедев Н. М., Арефьева А. Н и др.* Универсальный промышленный комплекс для дезактивации металлических радиоактивных отходов с использование ультразвука и электрохимии / В сб. докл. IV Межд. научно-технич. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ — 2016). М., НИКИЭТ им. Н. А. Доллежаля, 27—30 сентября 2016 г. С. 489—494.
20. *Демкин В. И., Дмитриев С. А.* Электромембранная переработка регенератов, образующихся при ионообменной очистке ЖРО / В сб. докл. Межд. рабочего семинара «Мембранные технологии в энергетике». Санкт-Петербург, НПФ «Гелла — ТЭКО», 2006. С. 34.
21. Evaporation of radioactive liquids. Проспект фирмы NUKEM, RWE NUKEM GmbH, January, 2002.
22. *Кичик В. А., Ягодин Г. А., Свитцов А. А.* Метод переработки жидких радиоактивных отходов, сочетающий селективное комплексообразование и ультрафильтрацию // Атомная энергия. 1985. Т. 58. С. 272—275.
23. Переработка РАО на ФГУП ГМП «Звездочка» в объекте 160/161. Проспект ФГУП ГМП «Звездочка» и НИПТБ «ОНЕГА». 2001.

Информация об авторах

Пензин Роман Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1), e-mail: Penzin_RA@nrcki.ru.

Свитцов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент РХТУ им. Д. И. Менделеева (125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, корп. 1), e-mail: tecoas@yandex.ru.

Библиографическое описание статьи

Пензин Р. А., Свитцов А. А. Развитие технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами АЭС // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 90—98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR HANDLING LIQUID RADIOACTIVE WASTE OF NUCLEAR POWER PLANTS

Penzin R. A.[1], Svitsov A. A.[2]

[1]NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

[2]Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Article received on August 26, 2020

The paper presents the results of a feasibility study focused on two methods designed to treat evaporator bottoms generated from the evaporation of liquid radioactive waste (LRW) at nuclear power plants (NPP), namely, deep evaporation (DE) and ion-selective decontamination (ISD). ISD method proved to be much more efficient and cost-effective compared to the DE one due to a drastic reduction of the conditioned radioactive waste volume intended *for disposal. The paper also considers possible opportunities for upgrading particular ISD stages. It provides recommendations on how to upgrade LRW treatment technologies at NPP of a new generation, including separated collection of basic LRW types and development of in situ RW processing and conditioning flowsheets.*

Keywords: *radioactive waste, NPP, evaporator bottoms, deep evaporation method, ion-selective decontamination method, operating costs.*

References

1. Riabchikov B. E. *Ochistka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Liquid Radioactive Waste Cleaning]. Moscow, Deli Print Publ., 2008. 516 p.

2. Stahiv M. R. *Obrashchenie s RAO na AES. OAO "Kontsern Rosehnergoatom"* [Treatment of Radioactive Waste at a Nuclear Power Plant. OAO "Rosenergoatom"]. Presented to the Scientific & Technical Advisory Council, 08.10.2014, Moscow, VNIIAES.

3. Sorokin V. T. Obosnovanie bezopasnosti zakhoroneniya solevogo plava, obrazuyushchegosya na ustanovkakh glubokogo uparivaniya AES, razmeshchennogo v konteinerakh NZK-150-1,5p [Disposal safety justifcation 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. 1—9.

4. Zaharova K. P., Himchenko O. M., Suhanov L. P. Razrabotka tekhnologicheskogo rezhima tsementirovaniya solevykh kontsentratov AEHS [Development of a Salt Concentrate Cementation Process at a NPP]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy,* 2007, vol. 103, no. 5, pp. 309—314.

5. Penzin R. A., Proskurina O. V. *Tekhnologicheskie resheniya po osnashcheniyu kompleksa, prednaznachennogo dlya obrashcheniya s RAO pri vyvode iz ehkspluatatsii ehnergoblokov no. 1 i no. 2 NV AES* [Technological solutions for Equipping a Complex designed for Radioactive Waste Management during Decommissioning of Power Units no. 1 and no. 2 of NV NPP]. Report on R&D, 2018, FSBI NRC "Kurchatov Institute". KUMP 314-ODIC.0001.

6. Penzin R. A., Proskurina O. V. et al. *Razrabotka tekhnologicheskoi skhemy po obrashcheniyu s demontirovannym oborudovaniem i radioaktivnymi otkhodami s uchetom logisticheskikh svyazei pri vyvode iz ehkspluatatsii ehnergoblokov № 1, 2 Novovoronezhskoi AES po variantu "nemedlennyi demontazh"* [Development of a Technological Scheme for Handling Dismantled Equipment and Radioactive Waste]. Report on R&D / FGBU NRC "Kurchatov Institute" Account Logistic Ties during the Decommissioning of Power Units No. 1, 2 of the Novovoronezh NPP according to the "Immediate Dismantling" Option", KUMP 314-ODIC.0003-2019.

7. Savkin A. E. *Pererabotka kubovykh ostatkov AEHS s ispol'zovaniem selektivnykh sorbentov* [Processing VAT Residues of Radioactive Waste with Selective Sorbents]. Cand. techn. sci. diss. Abstr. Moscow, MosNPO Radon Publ., 1999, 24 p.

8. Avezniyazov S. V. *Opyt ehkspluatatsii KP ZHRO Kol'skoi AES* [Operating Experience of the Kola NPP LRW KP]. Report at KNTS — 2011, Sosnovy Bor, Leningrad region.

9. Postanovleniye Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 19 oktyabrya 2012 g. N 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh othodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov" [Decree of the Government of the Russian Federation of 19 October 2012 No.1069 "On the criteria of designation of solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria of radioactive waste designation as non-retrievable radioactive waste and retrievable radioactive waste and criteria of classification of retrievable radioactive waste"].

10. SP 2.6.62572-2010. *Obespechenie radiacionnoi bezopasnosti pri obraschenii s otxodami atomnyx stanzi, sodergaschix texnogennye radionuklidy* [Ensuring radiation safety when handling industrial waste from nuclear power plants containing technogenic radionuclides]. Utv. prikazom Glawnogo gosudarstwennogo sanitarnogo wracha Russia ot 18 yanvary 2010 g. No. 4.

11. Ob ustanovlenii tarifov na zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov klassov 1, 2, 3, 4, 6 na period 2018—2022 gody i tarifov na zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov klassa 5 na 2018 god [On the establishment of tariffs for the disposal of radioactive waste of classes 1, 2, 3, 4, 6 for the period 2018—2022 and tariffs for the disposal of radioactive waste of class 5 for 2018]. Order of the FAS No. 1812/17 dated 28.12.2017.

12. Abalkina I. L. Opyt zakhoroneniya ONAO: perspektivy dlya Rossii [VLLW disposal experience: prospects for Russia]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 4 (5), pp. 15—23.

13. Lagunova Yu. O. *Ispol'zovanie ozona i perekisi vodoroda dlya okislitel'nogo razlozheniya organicheskikh kompleksonov v protsesse ochistki ZHRO* [The Use of Ozone and Hydrogen Peroxide for the Oxidative Decomposition of Organic Complexones in the Process of LRW Purification]. Cand. techn. sci. diss. Abstr. Moscow, MosNPO Radon Publ., 2012.

14. Alferov M. Ya., Koss A. V., Penzin R. A. RF Patent No. 2209350, prior. from 02.09.2002.
15. Basiev A. A., Khubetsov S. B. Razrabotka stupenchatoi tekhnologii okisleniya organicheskikh kompleksov kubovykh ostatkov AEHS [Development of a stepwise technology for the oxidation of organic complexes of bottoms of NPP]. *Reports of MNTK — 2018 "Safety, efficiency and economics of nuclear energy"*. Moscow, 2018, pp. 248—258.
16. Svitzov A. A., Demkin V. I., Saltykov B. V. Ehlektromembrannyi metod utilizatsii solevykh kontsentratov [Electromembrane method of utilization of salt concentrates]. *Reports of 10th of the Water-Chemical Forum.* Moscow, MEI Publ., 2017, pp. 42—48.
17. Mištová E. et al. Selective Sorption of Sb(V) Oxoanion by Composite Sorbents based on Cerium and Zirconium Hydrous Oxides. *Ion Exchange Letters,* 2008, no. 1, pp. 4—6.
18. Palatova S. V. Issledovaniya v oblasti dezaktivatsii materialov i oborudovaniya pri ehkspluatatsii i vyvode iz ehkspluatatsii AEHS [Research in the Deactivation of Materials and Equipment, while Using and Removing Radioactive Waste]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom — Foreign Atomic Technology,* 2018, no. 3, pp. 16—30.
19. Lebedev N. M., Arefyeva A. N. et al. Universal'nyi promyshlennyi kompleks dlya dezaktivatsii metallicheskikh radioaktivnykh otkhodov s ispol'zovanie ul'trazvuka i ehlektrokhimii [Universal Industrial for Deactivation of Metallic Radioactive Waste Using Ultrasound and Electrochemistry]. *Report at the IV International Technical Science Conference "Innovational Projects and Atomic Energy Technology"* (MNKT NIKIET – 2016), Moscow NIKIET N. A. Dollezhal, Sep. 27—30, 2016.
20. Demkin V. I., Dmitriev S. A. Ehlektromembrannaya pererabotka regeneratov, obrazuyushchikhsya pri ionoobmennoi ochistke ZHRO [Electromembrane of Regenerators Produced during an Ion Exchange Cleaning of Liquid Radioactive Waste]. *Reports of the International seminar "Membrane Technology in Energy".* Saint-Petersburg, NPF Gela-Techo Publ., 2006, p. 34.
21. Handout of NUKEM, "Evaporation of Radioactive Liquids", RWE NUKEM GmbH, January, 2002.
22. Kichik V. A., Yagodin G. A., Svitzov A. A. Metod pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov, sochetayushchii selektivnoe kompleksoobrazovanie i ul'trafil'tratsiyu [Liquid Radioactive Waste Processing Method with Selective Complex-Creation and Ultrafiltration]. *Atomnaya energiya — Atomic energy,* 1985, vol. 58, pp. 272—275.
23. Pererabotka RAO na FGUP GMP «Zvezdochka» v ob'ekte 160/161 [Radioactive Waste Processing at FGUP GMP "Star" in the object 160/161]. Handout FGUP GMP "Star" and NIPTB "ONEGA". 2001.

Information about the authors

Penzin Roman Andreevich, PhD, Leading Researcher, NRC «Kurchatov Institute» (1, Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia), e-mail: Penzin_RA@nrcki.ru.
Svitsov Alexey Alexandrovich, PhD, Assistant Professor, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (20, bld. 1, Geroyev Panfilovtsev st., Moscow, 125480, Russia), e-mail: tecoas@yandex.ru.

Bibliographic description

Penzin R. A, Svitsov A. A. Development of Technologies for Handling Liquid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants. *Radioactive Waste,* 2020, no. 4 (13), pp. 90—98. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-90-98.