

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Лебедев Н.М, Грот А.Н., Кукушкина А.А. (ООО «Александра-Плюс», Вологда, Россия), Васильев А.П. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Акатов А.А. (СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Современные объекты энергетики проектируются и эксплуатируются в соответствии со всеми нормами радиационной безопасности, но исчерпав свой ресурс, такие объекты подлежат демонтажу.

При выводе из эксплуатации атомных электростанций, ядерных энергетических установок, объектов ядерно-топливного цикла, радиохимических, химико-металлургических предприятий, появляется необходимость обращения с большими объемами металлических отходов, загрязненных различными веществами.

Решением этих проблем и занимается ООО «Александра-Плюс». Благодаря накопленному опыту, компания разрабатывает эффективные технологии и оборудование для дезактивации, что дает возможность снизить уровень радиоактивного загрязнения, допускающий вторичное использование дезактивированных материалов [1].

1. Совмещенная электрохимическая и ультразвуковая дезактивация

Для дезактивации металлов, загрязненных радиоактивными веществами, наиболее широко применяется метод жидкостной дезактивации, заключающийся в обработке изделия различными дезактивирующими растворами. Способами повышения эффективности этого метода является дезактивация с применением ультразвука, а также электрохимического анодного растворения поверхностных загрязненных слоев.

Сотрудничество с Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (СПбГТИ(ТУ)) позволило сделать шаг вперед на пути к созданию максимально эффективного способа дезактивации, который позволяет за разумно короткое время обеспечивать высокие коэффициенты дезактивации при условии образования минимального количества вторичных радиоактивных отходов. Многолетние совместные исследования, направленные на углубленное изучение совмещенной электрохимической и ультразвуковой (ЭХ+УЗ) дезактивации, проводимые на базе кафедры инженерной радиоэкологии и радиохимической технологии СПбГТИ(ТУ), Петербургского института ядерной физики, АО «ЭКОМЕТ-С», и Ленинградского отделения СЗТО ФГУП «РосРАО» (сейчас – ФГУП «ФЭО»), Ленинградской АЭС с использованием ультразвукового оборудования ООО «Александра-Плюс» подтвердили высокую эффективность этого способа дезактивации.

В ходе работ выполнялось экспериментальное моделирование физико-химических процессов дезактивации радиоактивно загрязненного металла электрохимическим методом с одновременным воздействием ультразвуковых колебаний, проведен ряд химических анализов и радиометрических измерений, разработаны основы технологии переработки образующихся вторичных отходов (отработавших растворов и промывных вод). Результаты экспериментов подтвердили преимущества совмещения электрохимической и ультразвуковой обработки. Выявлен резкий рост коэффициента дезактивации, высокая скорость процесса, максимально возможное удаление поверхностного загрязнения, экономическая эффективность.

Совмещенная обработка оказалась эффективной даже в однокомпонентных растворах малых концентраций, что выгодно с точки зрения снижения эксплуатационных затрат и упрощения переработки вторичных отходов. Для проведения высокоэффективной совмещенной ультразвуковой и электрохимической обработки сталей и других металлов допускается использование различных растворов кислот и щелочей, выбор которых зависит от штатных технологий переработки, применяемых на конкретном предприятии. На рисунке 1 представлен вид изготовленной по заказу НИКИЭТ установки для дезактивации НО-145, на которой проводились эксперименты с твердыми радиоактивными отходами (ТРО) Белоярской АЭС (рис. 2).



Рис. 1. Установка для дезактивации НО-145

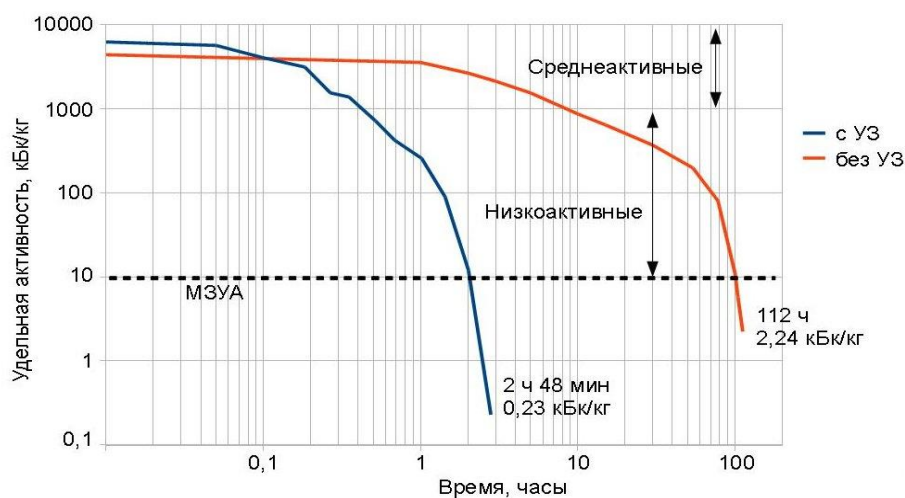


Рис. 2. Изменение удельной активности металлических образцов на Белоярской АЭС

В 2015 году для Нововоронежского Опытного-демонстрационного инженерного центра по выводу из эксплуатации (ОДИЦ) была изготовлена установка ультразвуковой дезактивации МО-382. Оборудование используется на Нововоронежской АЭС для ультразвуковой дезактивации металлических фрагментов с поверхностным загрязнением (фрагменты демонтированного оборудования, трубопроводов, арматуры). За год эксплуатации установки предприятие дезактивировало более 120 т металла. Большая часть (порядка 80%) обработанного металла была переведена из категории низко- и среднеактивных РАО в категорию промышленных отходов и около 20 % обработанного металла – в категорию низкоактивных отходов. Это позволило сократить площади, предназначенные для хранения РАО в помещениях главного корпуса блоков 1 и 2 НВ АЭС и значительно экономить средства, затрачиваемые на хранение радиоактивных отходов.

Значительные объемы радиоактивно загрязненного металла, образующегося при выводе из эксплуатации, потребовали увеличения производительности оборудования. В связи с этим в 2020 году для ОДИЦ была разработана и изготовлена полностью автоматическая линия совмещенной электрохимической и ультразвуковой дезактивации Alexpulse MO-643 (рис. 3). Применение совмещенной технологии, а также минимизация ручного труда (только загрузка и выгрузка изделий) позволили значительно сократить время на дезактивацию и, тем самым, достичь плановых показателей по объему переработки радиоактивно загрязненного металла (330 т/год при односменном режиме работы, 1000 т/год – при трехсменном). Данные технические решения защищены патентом [2].

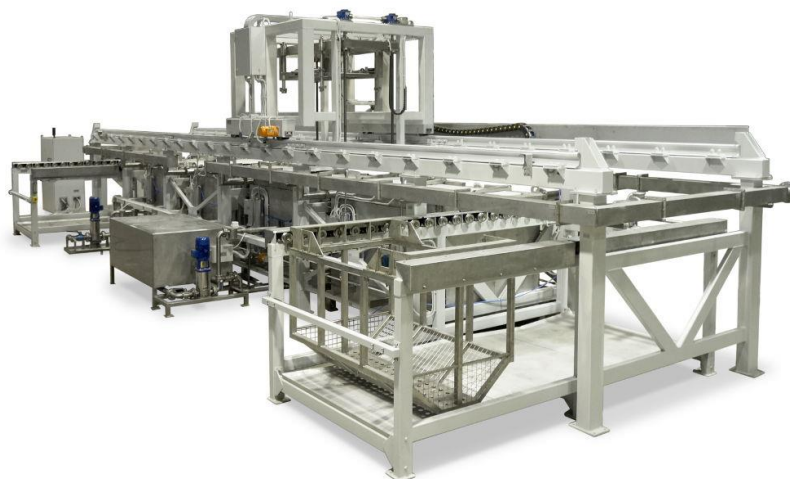


Рис. 3. Автоматическая линия совмещенной электрохимической и ультразвуковой дезактивации Alexpulse MO-643

2. Ультразвуковая дезактивация крупногабаритного оборудования без предварительной фрагментации

Трудности дезактивации производственных аппаратов радиохимической технологии и внутренних поверхностей контурного оборудования атомных энергетических установок обусловлены главным образом необходимостью растворения и удаления с дезактивируемых поверхностей радиоактивных осадков коррозионного и технологического происхождения. Активность указанного оборудования более чем на 99 % определяется активностью радионуклидов, входящих в осадок, поэтому разработка способа растворения осадка практически решает проблему очистки аппарата в целом [3].

Для очистки крупногабаритных емкостей известными методами, например, химической промывкой, требуется предварительная фрагментация емкости на части подходящего размера для размещения в ваннах дезактивации. Но в некоторых случаях мощность дозы излучения от оборудования настолько высока, что демонтаж и фрагментация становятся практически невыполнимыми задачами.

В 2020 году совместно с Государственным научным центром Российской Федерации – Физико-энергетическим институтом имени А.И. Лейпунского (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») и СПбГТИ(ТУ) была выполнена опытно-конструкторская работа по изучению влияния направленных ультразвуковых колебаний на процесс дезактивации корпуса выпарного аппарата.

За годы эксплуатации внутри выпарных аппаратов образовались нерастворимые радиоактивные солевые отложения на дне и шламовые образования на стенках, которые создавали высокий радиационный фон и ограничивали доступ к оборудованию персонала для его демонтажа. Таким образом, задачей данной работы было снижение

радиационного фона путем удаления из выпарного аппарата радиоактивных накоплений, которые не поддавались простому химическому растворению.

Известно, что применение ультразвука при химической дезактивации металлов позволяет значительно интенсифицировать процесс и сделать его более эффективным, но демонтажные работы, в рамках вывода из эксплуатации, существенно осложнялись следующими факторами:

- аппараты размещены в необслуживаемых помещениях 1 зоны, где ведутся работы с открытыми источниками излучения по I классу;
- доступ к оборудованию возможен только через специальный лаз малого диаметра в защитных железобетонных каньонах;
- аппараты имеют большие габаритные размеры (высота порядка 5 м, диаметр корпуса – 2–2,5 м), отсутствуют разъемные соединения;
- толщина стенки обечайки аппарата от 8 до 16 мм;
- наличие нерастворимых высокорadioактивных солевых отложений в донной части аппарата (в зоне рубашки охлаждения, что осложняет передачу УЗ колебаний) и шламовых образований на стенках.

Проведенные лабораторные исследования на реальных образцах отложений показали, что очистка выпарных аппаратов является комплексной задачей, включающей, по меньшей мере, две составляющие – удаление шламовых отложений со стенок аппарата и удаление отложений из донной части аппарата. В результате экспериментов были определены наиболее эффективные растворы и технологические режимы обработки.

Для определения оптимально-возможной схемы размещения ультразвуковых излучателей на выпарном аппарате учитывались имеющиеся ограничения и проводились эксперименты на физических моделях при сопоставимых условиях.

В результате проведенных опытно-промышленных испытаний на выпарном аппарате АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были получены следующие результаты:

- внутренние поверхности выпарного аппарата очищены от солевых отложений и шламовых образований на 90 %;
- мощность дозы гамма-излучения от выпарного аппарата в контрольных точках снизилась в 5 раз, что позволяет относительно безопасно проводить работы по демонтажу оборудования.

Полученные результаты легли в основу технологии, которая была использована для решения задачи по дезактивации выведенных из обращения емкостей из-под гексафторида урана объемом 2,5 м³, которых на площадке АО «АЭХК» накопилось более 20 000. В рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) совместно с АО «АЭХК» и СПбГТИ (ТУ) была разработана и изготовлена опытно-промышленная установка, предназначенная для ультразвуковой дезактивации емкостей (рис. 4).



Рис. 4. Опытно-промышленная установка

Для крупногабаритного оборудования, имеющего только внутреннее загрязнение (емкости, аппараты), в качестве полезной опции рассматривают дезактивацию без фрагментации с применением «контактного ультразвука» – когда излучатели прочно закрепляются на внешней поверхности оборудования, а внутрь заливается деактивирующий раствор. Ультразвук проходит через стенку оборудования, распространяясь по металлу, и значительно ускоряет процесс удаления отложений и травления металла на внутренней поверхности.

Если же применение «контактного ультразвука» по какой-либо причине является неприемлемым (например, возникают сложности при закреплении излучателей на внешней поверхности оборудования), может быть применено иное решение – погружной ультразвуковой блок. В этом случае сама емкость или аппарат становится ванной, в которую помещается герметичная сборка из нескольких ультразвуковых излучателей, которые оказывают воздействие на внутреннее загрязнение опосредованно – через деактивирующий раствор. Очищающее действие ультразвука в таком варианте обычно оказывается более слабым, однако длительность вспомогательных операций значительно сокращается.

Результаты проведенных испытаний показали, что уровень загрязнения внутренней поверхности емкостей 2,5 м³ обычно невысок, и, следовательно, задача ее очистки до достижения установленных критериев радиационной чистоты металлолома вполне решаема. Применение погружного ультразвукового излучателя позволило достичь практически нулевого уровня остаточного загрязнения внутренней стенки емкостей при дезактивации с помощью 10 % (масс.) серной кислоты при 40 °С за 20 мин (полный цикл занимал 1 ч). Выбор серной кислоты основывался на результатах ранее проведенного обзора научно-технических источников и выполненных лабораторных испытаний.

Как уже отмечалось, использование погружного ультразвукового блока дает возможность полностью очистить внутреннюю поверхность емкостей, что позволяет рассматривать их после фрагментации как чистый металлолом.

Следует отметить, что очистка емкостей без предварительной фрагментации позволит сократить время работы с ними, число операций по разрезанию, снизит уровень потенциальной опасности для рабочих. Поскольку фрагментация ведется с помощью аппаратов плазменной резки (ESAB 120, ПУРМ-400М), эффективная предварительная дезактивация приведет к значительному снижению объемной аэрозольной активности и содержания фторидов в воздухе рабочей зоны. Отсутствие необходимости в последующей обработке фрагментов по штатной технологии позволит резать емкости на куски большего размера, пригодные для транспортировки на предприятие по переработке лома черных металлов.

Согласно оценке экономической эффективности дезактивация емкостей экономически обоснована, так как позволяет не только снизить количество РАО, но и дополнительно получить выручку от реализации металла. Расчеты показали, что выручка от реализации дезактивированного металла в качестве металлолома полностью покрывает затраты на дезактивацию, а также получится прибыль до 10 000 руб. за тонну.

3. Ультразвуковая дезактивация трубопроводного оборудования и оболочек твэлов

Одним из направлений дезактивации, где успешно может применяться ультразвук, является дезактивация труб.

В 2012 году для решения специальной задачи – дезактивации оболочек твэлов была изготовлена установка модели МО-174, совмещающая ультразвуковую и электрохимическую обработку. Во время эксплуатации оборудования получены достаточно высокие степени дезактивации оболочек твэлов от поверхностного альфа-

загрязнения: при исходной загрязненности труб около 1000 част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$) достигнуты значения не выше 5 част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$). Эксплуатация этой установки в течение нескольких лет в двусменном режиме подтвердила высокую надежность оборудования.

На основе полученного положительного опыта эксплуатации в 2020 году на базе МО-174 была разработана полностью автоматическая установка дезактивации поверхностей твэлов Alexpulse MO-726 для Горно-химического комбината (рис. 5). От МО-174 она отличается тем, что все операции, такие как подача твэла в установку, его дезактивация, ополаскивание и сушка, а также выдача на последующую обработку, выполняются в автоматическом режиме.

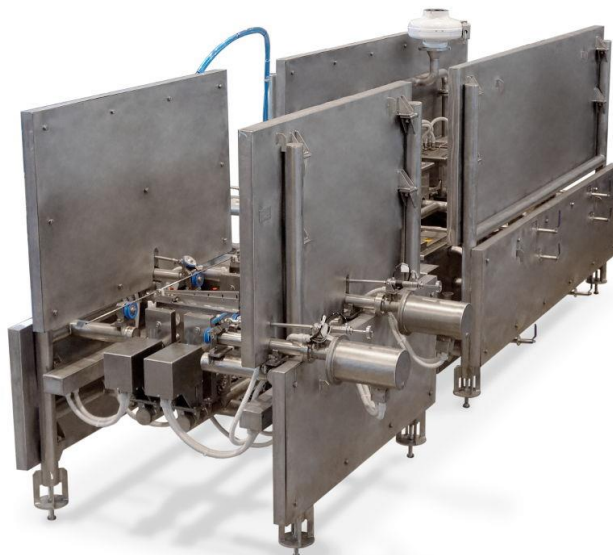


Рис. 5. Пост ультразвуковой и электрохимической дезактивации твэлов Alexpulse MO-726

Также ООО «Александра-Плюс» разработана технология бесконтактной ультразвуковой очистки внутренней поверхности труб. За счет применения запатентованных фокусирующих ультразвуковых излучателей очищаемая труба вводится в резонанс, в результате чего загрязнения начинают интенсивно отслаиваться как от наружной, так и от внутренней поверхности. Оборудование, реализующее данную технологию, с 2018 года успешно эксплуатируется на ТМК-ИНОКС, где с ее помощью очищаются трубы длиной до 42 метров, предназначенные для теплообменного оборудования, изготавливаемого в рамках проекта «Прорыв», и на Чепецком механическом заводе для удаления прокатных смазок и продуктов их окисления с внутренней и наружной поверхностей труб из циркониевых сплавов при производстве твэлов. Данная технология защищена патентом [4] и в настоящее время на ее основе производятся полностью автоматизированные высокопроизводительные комплексы.

4. Ультразвуковая дезактивация грунта

Одной из приоритетных задач по снижению объемов РАО, подлежащих кондиционированию и долговременному хранению, является разработка технологии дезактивации радиоактивно загрязненного грунта (РЗГ), которого за годы эксплуатации различных объектов использования атомной энергии накопилось огромное количество.

Ультразвуковая дезактивация радиоактивно загрязненного грунта — это новое направление в эффективном решении очистки грунта путем воздействия ультразвука на загрязненный грунт, что способствует повышению степени очистки грунта. Ультразвук способствует ускорению и увеличению степени дезинтеграции грунта, а также росту скорости и глубины протекания физико-химических процессов по очистке грунта.

При дезактивации грунтов важно отделить фракцию, содержащую наибольшее количество радиоактивных загрязнений. Это, как правило, самая мелкая фракция. Таким образом, задача сводится к отмывке крупных частиц от связанных с ними мелких. Отличные результаты были получены даже на грунтах с фракцией менее 1 мм. Следует заметить, что альтернативные способы (например, гидросепарация) малоприменимы для столь тонких грунтов.

Проведенные в 2010 году совместно с АО «НИКИЭТ им. Доллежалея» испытания показали, что применение ультразвука позволяет значительно интенсифицировать процесс реагентной дезактивации грунта и повысить ее эффективность. Другой важной особенностью является то, что ультразвуковые установки экономичны в плане эксплуатации и отличаются значительно меньшим энергопотреблением по сравнению с установками гидросепарации.

Полученные результаты заинтересовали крупнейшие предприятия атомной промышленности, в частности Ангарский электролизный химический комбинат (АЭХК).

В рамках НИОКР совместно с АО «АЭХК» и СПбГТИ (ТУ) были проведены испытания на опытно-промышленной установке ультразвуковой дезактивации с использованием реальных образцов радиоактивно загрязненного грунта, отобранных с площадок дочерних обществ Топливной компании «ТВЭЛ», а именно: АО «АЭХК», АО «СХК», ПАО «НЗХК», АО «ЧМЗ» (рис. 6).



Рис. 6. Опытно-промышленная установка ультразвуковой дезактивации

Опытно-промышленная установка включает в качестве основного элемента ультразвуковой лоток, в котором пульпа, состоящая из грунта и дезактивирующего раствора, подвергается действию ультразвука частотой 25 кГц. Для перемещения пульпы по лотку используется транспортер с лопатками, а дезактивирующий раствор разбрызгивается на грунт через форсунки. Поскольку лоток наклонен, то дезактивирующий раствор, содержащий загрязнители, сливается из нижней части лотка, затем направляется через кавитатор в разделительную емкость и на механические фильтры, где освобождается от дисперсных загрязнителей, а затем через форсунки снова подается в лоток. Грунт, перемещаемый с помощью лопаток по лотку вверх, попадает через горловину лотка в приемную емкость с перфорированным дном, где отводятся остатки дезактивирующего раствора.

Трубный ультразвуковой кавитатор, через который дезактивирующий раствор, проконтактировавший с грунтом в лотке, подается в разделительную емкость, представляет собой отрезок трубы с интенсивным ультразвуковым полем. В нем происходит дополнительная дезинтеграция мелкой фракции грунта, вынесенной

из лотка с дезактивирующим раствором, а также интенсификация процессов перехода загрязнителей в раствор. Далее в разделительной емкости – баке с перегородками – осуществляется отстаивание части взвесей, а оставшиеся, более мелкие, удаляются на фильтрах.

Проведенные работы и оценка экономической эффективности показали, что целесообразность дезактивации грунта экономически обоснована только при переводе РАО из более высокого класса в более низкий. При этом экономия на захоронении и контейнеризации грунта может достигать сотен тысяч рублей за 1 м³ дезактивируемого грунта.

Заключение

В докладе представлен обзор перспективных методов ультразвуковой дезактивации радиоактивно загрязненных металлов. Приведены примеры различных конструкций технологического оборудования, предназначенного для решения весьма сложных задач, возникающих при подготовке к выводу и выводе из эксплуатации оборудования предприятий ядерной отрасли.

Освещена технология совмещенной электрохимической и ультразвуковой дезактивации радиоактивно загрязненных металлов, высокая эффективность которой подтверждена многочисленными испытаниями на реальных образцах и действующим технологическим оборудованием.

Кроме того, в докладе представлена информация о проведенной опытно-конструкторской работы по разработке технологии ультразвуковой дезактивации крупногабаритного оборудования без предварительной фрагментации. Описанная технология наложения ультразвуковых колебаний на внешнюю поверхность крупногабаритного аппарата («контактный ультразвук») позволяет интенсифицировать химические и массообменные процессы на его внутренней поверхности, и, следовательно, удалять с нее радиоактивные загрязнения. В результате снижается дозовая нагрузка на персонал при последующем демонтаже и утилизации аппарата.

В докладе также описана инновационная технология бесконтактной очистки наружной и внутренней поверхностей труб с помощью силового ультразвука, которая может эффективно применяться при дезактивации трубопроводного оборудования и оболочек твэлов.

Не менее актуальной при выводе из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла является задача дезактивации радиоактивно загрязненного грунта, объемы которого на предприятиях «Росатома» достаточно велики. В докладе рассматривается опыт применения для этих целей ультразвуковой дезактивации.

Список литературы

1. Н.М. Лебедев, А.Е. Савкин, О.К. Карлина, А.П. Васильев, В.М. Малинкин, Г.В. Дубинин, Б.А. Смирнов. Испытания ультразвуковой установки для дезактивации металлических РАО. Безопасность окружающей среды, 2007. – № 3. – с. 38-41.
2. Патент РФ № 2695811, МПК G21F9/34. Комплексная установка дезактивации твердых радиоактивных отходов и кондиционирования образующихся жидких радиоактивных отходов.
3. Ядерная технология: учебное пособие для вузов / В. П. Шведов, В. М. Седов, И. Л. Рыбальченко, И. Н. Власов; Под общ. ред. И. Д. Морохова. – М.: Атомиздат, 1979. – 336 с.
4. Патент РФ № 2744055, МПК E21B 37/00. Способ ультразвуковой очистки трубы и устройство для его осуществления.