

СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЕЗАКТИВАЦИИ СПЕЦОДЕЖДЫ В СРЕДЕ СЖИЖЕННОГО ФРЕОНА

Е. И. Корочкин¹, А. Ю. Николаев¹, А. А. Мурзин¹, Н. Е. Мишина¹, Н. В. Рябкова¹,
Э. М. Никитин², А. Н. Рыбин², Д. А. Семенов², А. И. Ермаков², Е. В. Беспала³

¹АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург

²АО «ТВЭЛ», Москва

³АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов»,
Северск, Томская область

Статья поступила в редакцию 31 марта 2025 г.

В данной статье описан процесс разработки и испытания экспериментального образца установки дезактивации спецодежды в сжиженном фреоне (далее – установка). Подробно представлен этап лабораторного макетирования, целью которого являлось определение технологических параметров процесса и подбор наиболее эффективной дезактивирующей рецептуры. По итогам лабораторного этапа был создан экспериментальный образец установки, который испытан в условиях реального производства. В результате серии экспериментов были определены коэффициенты дезактивации, которые составили до 30 для α -загрязнений и до 48 для β -загрязнений, и продемонстрирована целесообразность проведения дальнейших исследований. Предлагаемая безводная дезактивация в перспективе способна обеспечить снижение объема вторичных радиоактивных отходов от процесса дезактивации в 300–400 раз по сравнению с классической с применением водных дезактивационных растворов.

Ключевые слова: дезактивация, безводная дезактивация, флюидная экстракция, спецодежда, спецпрачечная, сжиженные газы, радиоактивные отходы.

Введение

В процессе работы на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) персонал применяет средства индивидуальной защиты (СИЗ), которые получают загрязнения, в т. ч. радиоактивного характера. В целях обеспечения безопасных условий труда сотрудников, согласно принятым нормам [1], необходимо осуществлять дезактивацию СИЗ в соответствии с действующими нормативными документами (НРБ-99, ОСПОРБ-99 и др.). Существующая система дезактивации спецодежды предполагает обработку тканых изделий водными растворами

поверхностно активных веществ (ПАВ) и дезактивирующих добавок в стиральных машинах барабанного типа. Вторичные радиоактивные отходы (РАО) после проведения стирки по содержанию радиоактивных веществ (РВ) попадают под классификацию «низкоактивные отходы» (НАО). Принятые технологии обращения с подобными жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) предполагают их упаривание с дальнейшим отверждением (как правило, включением в цементные матрицы). Однако такие методы переработки осложнены существенным

количеством неорганических солей и ПАВ в составе стоков спецпрачечных (от 100 до 140 кг реагентов на 1 т СИЗ). В результате образуется от 40 до 70 м³ вторичных РАО [1], что составляет существенную долю всех образующихся радиоактивных отходов предприятия (от 20% до 50% в зависимости от специфики) [2].

Снижение объема ЖРО возможно при применении альтернативных технологий, таких как, например, дезактивация в среде сжиженных газов [3]. Данная технология широко известна в промышленности в виде сверхкритической, флюидной экстракции, которая широко применяется в пищевой, парфюмерной, медицинской и других отраслях, так как позволяет весьма эффективно извлекать целевые компоненты из природного сырья [4], [5].

Технология флюидной дезактивации подразумевает удаление радионуклидов (РН) с поверхностей растворами на основе сжиженных газов [6], которые затем могут быть относительно легко выделены из отработавшей смеси путем изменения давления в системе. Указанный метод позволяет сократить объем образующихся вторичных отходов до 300 раз (данное значение продиктовано количеством вводимых дезактивирующих добавок, число и дозировка которых может меняться) по сравнению с классической технологией с применением водных растворов [7], [8]. При этом вторичные РАО представляют собой смесь ПАВ, различных активаторов и усилителей чистки и всех загрязнений, которые удалось перевести с поверхности СИЗ в дезактивирующий раствор.

Настоящая работа является продолжением исследований АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» в области сверхкритической и флюидной экстракции [9], [10].

Ее целью являлось создание экспериментального образца установки дезактивации спецодежды в сжиженном фреоне.

Лабораторный этап

Использование газов при сверхкритических параметрах подразумевает работу под высоким давлением (100 и более атм), что влечет за собой необходимость применения более металлоемкого оборудования, дополнительных систем безопасности, дорогостоящих компрессорных устройств и т. д.

В поиске возможностей для проведения процесса при более низких давлениях сотрудниками АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» были выполнены исследования [11], [12], показавшие, что, во-первых, процесс дезактивации весьма эффективно может протекать и при давлениях, соответствующих области сжиженных газов, без необходимости ухода в область сверхкритических параметров. Во-вторых, была показана принципиальная возможность применения сжиженных фреонов, имеющих более низкое давление сжижения, вместо общепринятого диоксида углерода.

Среди коммерчески доступных вариантов наиболее подходящим оказался фреон R-134a (1,1,1,2-тетрафторэтан) [13], т. к. он удовлетворяет требованиям пожаровзрывобезопасности, является озон-дружественным и обладает более низкими параметрами сжижения по сравнению с принятым в сверхкритической экстракции углекислым газом.

С целью определения оптимальных параметров проведения процесса безводной дезактивации, а также испытания дезактивирующих рецептур был создан лабораторный макет будущей установки (рис. 1).

Он представляет собой две цилиндрические стальные ячейки (объемом по 70 мл) автоклавного типа, соединенные последовательно. Каждая из них оборудована перемешивающим механизмом и обогревом. Подача растворителя осуществляется при помощи поршневого насоса

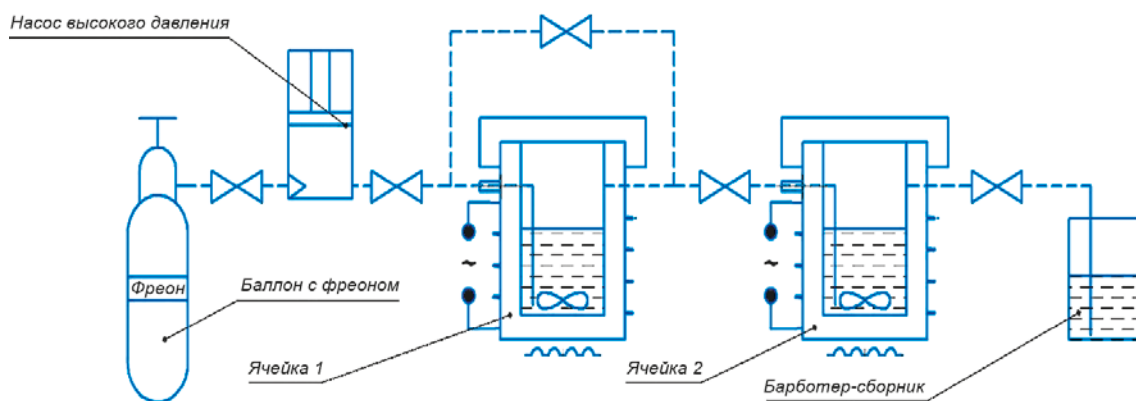


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного макета установки

высокого давления из исходной емкости. После завершения процесса реакционная смесь стравливается в емкость с ацетоном, где растворитель переходит в газовую фазу (откуда впоследствии может быть сконденсирован), а компоненты смеси абсорбируются.

Методика проведения лабораторных исследований

Ячейка 1 предназначена для подготовки дезактивирующей смеси, в ячейке 2 располагается дезактивируемый образец и происходит процесс дезактивации.

Подготовка рецептуры выглядит следующим образом: в ячейку 1 вносят необходимое количество дезактивирующих добавок, после чего ее герметизируют и нагревают до рабочей температуры. Затем в нее дозируют 30 мл сжиженного газа при заданном давлении, выжидают 5–10 минут до растворения дезактивирующих добавок, после чего вводят еще 25 мл сжиженного газа и наблюдают еще 5–10 минут для гомогенизации раствора. Суммарный объем смеси для проведения одного цикла дезактивации составлял 55 мл. Данный метод был выбран по результатам экспериментов по растворению предполагаемых дезактивирующих добавок, так как продемонстрировал наибольшую скорость и полноту их растворения.

Одновременно с подготовкой дезактивирующей смеси ячейку 2 (содержащую дезактивируемый образец) также нагревают до заданной температуры и заполняют чистым сжиженным газом при установленном давлении. Это позволяет избежать его резких перепадов при прокачке дезактивирующей среды через ячейку 2, т. к. это приводит к вскипанию смеси и выделению дезактивирующих добавок из раствора.

Далее готовую дезактивирующую смесь из ячейки 1 передают в ячейку 2 путем ее выдавливания порцией чистого сжиженного газа. После этого при перемешивании в ячейке 2 начинается стадия дезактивации, в этом состоянии систему выдерживают 20 минут для перевода загрязнений с поверхности образца в дезактивирующую смесь. Затем отработавший раствор из ячейки 2 выдавливают порцией чистого сжиженного газа. Процесс осуществляется до тех пор, пока через нее не пройдет двукратный объем дезактивирующей смеси. За счет пропуска порции чистого фреона удается удалить из ячейки и с образца остатки дезактивирующей рецептуры и загрязнений.

На выходе из ячейки 2 расположена емкость, заполненная ацетоном. В результате изменения

давления газовая фаза отделяется, а прочие компоненты отработавшего раствора абсорбируются в объеме ацетона.

Результаты лабораторного этапа

В качестве рабочей была определена температура 60 °С, т. к. если она ниже 40 °С, в должной мере не протекает дезактивация [1], а при ее повышении до 80 °С начинают происходить необратимые изменения в структуре некоторых тканей и элементов фурнитуры. Рабочее давление, соответствующее данной температуре на линии насыщения, составляет 15 атмосфер (для фреона R-134a).

Помимо создания установки, в ходе лабораторных исследований проводились эксперименты по определению индивидуальной дезактивирующей способности ранее отобранных добавок в целях выбора дезактивирующей рецептуры. Отбор этих добавок осуществлялся по следующим критериям: растворимость в среде сжиженного фреона, пожаровзрывобезопасность, коммерческая доступность. Далее были исследованы возможные комбинации наиболее эффективных добавок. Для исследования эффективности дезактивации в качестве дезактивируемых образцов использовались фрагменты ткани (х/б, лавсан, смесовая ткань) с заранее нанесенными азотнокислыми растворами радионуклидов, наиболее распространенных на радиохимических предприятиях (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{99}Tc , ^{65}Zn , ^{233}U , ^{239}Pu).

В ходе серии экспериментов по определению эффективности дезактивирующих добавок и их смесей был получен массив данных в виде набора матриц коэффициентов дезактивации. Их анализ позволил выявить наиболее эффективные добавки и их комбинации для проведения процесса безводной дезактивации.

По итогам испытаний удалось подобрать унифицированную смесь добавок, показывающую удовлетворительные коэффициенты дезактивации во всем спектре исследованных радионуклидов (от 10 до 100 суммарно за 3 цикла дезактивации). В состав дезактивирующей рецептуры были включены: смесь ПАВ, химические усилители чистки, органические производные фосфорной кислоты, ароматические углеводороды сложной структуры, а также замещенные карбоновые кислоты. Добавление компонентов производилось по аддитивному принципу, синергетических эффектов не было выявлено. Для наглядности в табл. 1 приведены коэффициенты дезактивации подобранной рецептуры для использованных в исследовании

радионуклидов и образцов материалов СИЗ за 3 цикла дезактивации.

Таблица 1. Коэффициенты дезактивации предложенной универсальной дезактивирующей рецептуры

Радионуклид	Х/б ткань	Смесовая ткань	Лавсан
¹³⁷ Cs	33,6	56,9	68,0
⁶⁰ Co	11,2	10,6	21,8
⁹⁰ Sr	12,5	10,9	12,1
⁹⁹ Tc	16,3	16,7	15,6
⁶⁵ Zn	12,4	13,2	15,7
²³³ U	11,5	9,7	10,4
²³⁹ Pu	5,9	6,1	6,3

Экспериментальная установка дезактивации спецодежды в сжиженном фреоне

На основе данных, полученных в ходе лабораторного этапа, были сформированы технические требования к проектированию экспериментального образца установки (табл. 2).

Таблица 2. Технические характеристики создаваемой экспериментальной установки

Параметр	Значение
Рабочая температура, °С	60
Рабочее давление, атм.	15
Пиковая мощность, кВт	≤12
Разовая загрузка СИЗ, кг	до 3
Объем реактора, л	60
Рецикл растворителя	+

Технологический процесс безводной дезактивации условно представлен на рис. 2.

Исходя из указанных технических характеристик спроектирован и создан экспериментальный



Рис. 2. Условное изображение технологического процесса дезактивации

образец установки. Компонровка была выполнена по интегральной схеме — все технологические узлы закреплены на цельносварной раме, которая снаружи закрыта защитными панелями, образующими единый кожух, являющийся одним из барьеров безопасности на случай экстренной разгерметизации узлов оборудования. Внутри установки также предусмотрена precisely-вытяжная вентиляция с системой фильтров для удаления веществ из ее объема в случае разгерметизации.

Оператор загружает в реактор загрязненные СИЗ, дезактивирующие добавки в необходимом количестве, после чего герметизирует реактор и на пульте управления включает программу «стирки». Дальнейший процесс полностью автоматизирован и суммарно занимает порядка 2 часов (без учета подготовительных операций). После запуска установки в автоматическом режиме реактор и испаритель вакуумируются, затем в реактор подается порядка 20 литров сжиженного фреона, который доводят до рабочих условий (табл. 1) путем электрообогрева внешней стенки реактора. Затем начинается процесс «стирки». Внутри реактора установлен перфорированный барабан, который приводится во вращение за счет электропривода с магнитной муфтой. Этап непосредственно «стирки» занимает 20 минут, далее следует удаление отработавшей дезактивирующей смеси в емкость-испаритель. Слив осуществляется самотеком за счет открытия запорной арматуры между реактором и испарителем. После этого реактор вновь наполняется фреоном и происходит процесс «полоскания» (также 20 минут), затем фреон снова сбрасывается в испаритель. Далее этап «полоскания» повторяется еще раз. По его завершении включается холодильная машина, которая позволяет с высокой эффективностью регенерировать фреон из отработавшей смеси в ресивер и имеет свой собственный «чистый» фреоновый контур, который не смешивается с циркулирующим через реактор. После полной регенерации фреона в реактор напускается атмосферный воздух, оператор открывает его и извлекает чистые СИЗ.

Описываемая установка была создана и испытана на реальных образцах СИЗ (х/б, лавсан и смесовые ткани) в условиях действующего радиохимического предприятия (научно-экспериментальный комплекс в г. Гатчина). Согласно результатам, полученным в ходе предварительных испытаний (табл. 3), было показано, что данная установка функционирует в штатном режиме и позволяет дезактивировать спецодежду, загрязненную радионуклидами. Также было

показано, что проведение более двух циклов дезактивации нецелесообразно, т. к. это не приводит к существенному снижению остаточной загрязненности.

Таблица 3. Результаты дезактивации реальных образцов спецодежды на установке в условиях радиохимического предприятия

Цикл дезактивации	K_d (α -загрязнений)	K_d (β -загрязнений)
1	5–5,5	24
2	6	2
3	1	1
Суммарное значение	30	48

Приведенные значения коэффициентов дезактивации (K_d) демонстрируют принципиальную возможность дезактивации спецодежды в среде сжиженного фреона с помощью созданной установки. Что касается эффективности данной технологии, более показательны в этом вопросе значения начальных и конечных уровней радиоактивного загрязнения. На рис. 3 и 4 представлены диаграммы их сравнения для 6 испытываемых образцов спецодежды, по которым видно, что в результате дезактивации удается удалить существенное количество радионуклидов в процессе дезактивации.

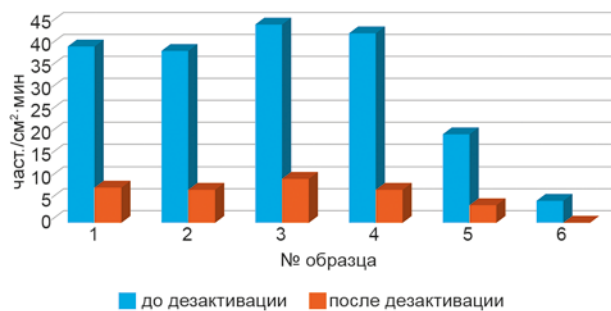


Рис. 3. Диаграмма сравнения начальных и конечных уровней α -загрязнения образцов спецодежды

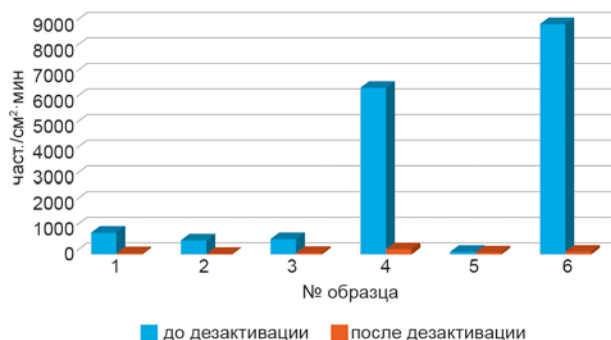


Рис. 4. Диаграмма сравнения начальных и конечных уровней β -загрязнения образцов спецодежды

Результаты предварительных экспериментов показали, что в определенных случаях удается достичь уровней остаточного загрязнения ниже контрольных. Дальнейшие исследования и усовершенствование технологического процесса могут позволить добиться стабильности дезактивации вне зависимости от характера загрязнения и начального уровня активности.

Следует также отметить, что, помимо удаления радиоактивных загрязнений, наблюдалась также очистка СИЗ от бытовых загрязнений в виде смазочно-охлаждающих веществ, сажи, пыли и потожировых следов (рис. 5).



Рис. 5. Образец спецодежды, содержащий бытовые загрязнения, до (а) и после (б) проведения дезактивации

Финальный вид установки продемонстрирован на рис. 6. На данный момент она снабжена



Рис. 6. Реальный вид экспериментального образца установки безводной дезактивации СИЗ

автоматизированной системой управления с пользовательским интерфейсом, которая позволяет минимизировать вовлеченность оператора в технологический процесс.

По прошествии нескольких циклов дезактивации вторичные отходы удаляются из испарителя при помощи сливного отверстия на дне емкости.

Вторичные РАО процесса безводной дезактивации представляют собой густую маслянистую жидкость, включающую отработавшие дезактивирующие добавки и загрязнения, снимаемые с поверхности спецодежды, (радионуклиды, телесные выделения, пыль, сажа, смазочно-охлаждающие вещества). Их извлечение на экспериментальном образце установки дезактивации СИЗ происходит в ручном режиме.

Заключение

В ходе работы были проведены лабораторные исследования, на основе которых определены рабочие параметры процесса безводной дезактивации — давление 15 атмосфер и температура 60 °С. В качестве растворителя выбран фреон-134а. Также были сформированы исходные данные для создания экспериментального образца установки безводной дезактивации.

В ходе серии экспериментов по определению эффективности дезактивирующих добавок и их смесей был получен массив данных в виде набора матриц коэффициентов дезактивации. Анализ полученных данных позволил выявить наиболее эффективные добавки и их комбинации для проведения процесса безводной дезактивации.

Был создан экспериментальный образец установки безводной дезактивации, который был испытан в условиях действующего радиохимического предприятия на реальных образцах СИЗ с реализацией рецикла растворителя в контуре установки. Данные испытания доказали перспективность дальнейших исследований в области безводной дезактивации, определены коэффициенты дезактивации для установки при заданных условиях и рецептуре дезактивирующей смеси, которые составили в среднем до 30 для α -загрязнений и до 48 — для β -загрязнений. Также была показана эффективность установки при удалении нерадиоактивных загрязнений.

В дальнейшем планируются работы по набору статистики и оптимизации дезактивирующей рецептуры под нужды конкретных предприятий, что позволит снизить стоимость процесса и повысить его эффективность. Дополнительно предусмотрена модернизация установки с

целью повышения ее эффективности и сокращения временных затрат на один цикл дезактивации. Помимо этого, проводятся исследования по обращению с вторичными отходами процесса безводной дезактивации.

Литература

1. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.10.2003 №157 «О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.8.46-03 «Санитарные правила по дезактивации средств индивидуальной защиты». Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 26.10.2003 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 05.12.2003 № 5298). — М. : МОРКНИГА, 2020. 47 с.
2. Рябчиков Б. Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. — М. : ДеЛи принт, 2009. 516 с.
3. Патент № 2274486 С2 Российская Федерация, МПК В01Д 59/24, G21F 9/28. Способ экстракции металлов : № 2003113308/06 : заявл. 05.05.2003 : опубл. 20.04.2006 / В. А. Бабаин, В. В. Бондин, С. И. Бычков и др. ; заявитель Государственное унитарное предприятие Научно-производственное объединение «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Федеральное государственное унитарное предприятие Горно-химический комбинат.
4. Boufetacha M., Ayad A., Thiebault N. et al. Selective extraction of carnosic acid, carnosol, and rosmarinic acid from *Rosmarinus officinalis* L. using supercritical fluid and their antioxidant activity // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2024. Vol. 212. P. 106344. DOI: 10.1016/j.supflu.2024.106344.
5. López-Hortas L., Rodríguez P., Díaz-Reinoso B. et al. Supercritical fluid extraction as a suitable technology to recover bioactive compounds from flowers // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2022. Vol. 188. P. 105652. DOI: 10.1016/j.supflu.2022.105652.
6. Meguro Y., Iso S., Yoshida Z. et al. Decontamination of uranium oxides from solid wastes by supercritical CO₂ fluid leaching method using HNO₃-TBP complex as a reactant // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2004. Vol. 31. No. 2. Pp. 141—147. DOI: 10.1016/j.supflu.2003.10.005.
7. Tueur A., Beziat A., Carles M. et al. Supercritical fluid extraction for cleaning with heavy metals and radionuclides. 4th Meeting on Supercritical Fluids. I.N.S.A. Villeurbanne, France, 20—21 January 1997. Pp. 55—61.
8. Shadrin A. Yu., Murzin A. A., Shafikov D. N., Kamachev V. A. Deactivation of metals, fabrics and soils in a liquid CO₂ medium // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2007. Vol. 41. No. 5. Pp. 786—792. DOI: 10.1134/S0040579507050594.

9. Самсонов М. Д., Шадрин А. Ю., Шафигов Д. Н., Куляко Ю. М., Мясоедов Б. Ф. Сверхкритическая флюидная экстракция в современной радиохимии // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 2. С. 97–106.
10. Шадрин А. Ю., Мурзин А. А., Шафигов Д. Н. и др. Деактивация металлов, тканей и почв в среде жидкого CO₂ // Химическая технология. 2007. Т. 8. № 3. С. 134–140.
11. Шадрин А. Ю., Мурзин А. А., Шафигов Д. Н., Камачев В. А. Деактивация в среде сверхкритических флюидов и сжиженных газов // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Т. 2. № 663. С. 40–47.
12. Камачев В. А., Шадрин А. Ю., Мурзин А. А., Шафигов Д. Н. Экстракция актиноидов растворами нейтральных экстрагентов в сверхкритических и сжиженных фреонах // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Т. 2. № 3. С. 48–56.
13. Максимов Б. Н., Барабанов В. Г. Промышленные фторорганические продукты : Справочник. — Ленинград, Химия, 1990. 464 с.

Информация об авторах

Корочкин Егор Игоревич, инженер 2 категории, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: e.korochkin@khlopin.ru.

Николаев Артем Юрьевич, научный сотрудник, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: anikolaev@khlopin.ru.

Мурзин Андрей Анатольевич, кандидат химических наук, научный консультант, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: aamurzin@khlopin.ru.

Мишина Надежда Евгеньевна, кандидат химических наук, начальник лаборатории, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: mishina@khlopin.ru.

Рябкова Надежда Валентиновна, кандидат химических наук, начальник отдела, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: ryabkova@khlopin.ru.

Никитин Эдуард Михайлович, директор по выводу из эксплуатации ЯРОО и обращению с РАО, АО «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49), e-mail: emnikitin@tvel.ru.

Рыбин Алексей Николаевич, руководитель группы, АО «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49), e-mail: anrybin@tvel.ru.

Семенов Дмитрий Андреевич, начальник отдела, АО «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49), e-mail: dmianrsemenov@tvel.ru.

Ермаков Александр Иванович, кандидат химических наук, главный эксперт, АО «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49), e-mail: aleivaermakov@tvel.ru.

Беспала Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора, АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов» (636000, Томская обл., ЗАТО Северск, а/я 654), e-mail: bevl@dnrc.ru.

Библиографическое описание статьи

Корочкин Е. И., Николаев А. Ю., Мурзин А. А., Мишина Н. Е., Рябкова Н. В., Никитин Э. М., Рыбин А. Н., Семенов Д. А., Ермаков А. И., Беспала Е. В. Создание и испытание экспериментальной установки деактивации спецодежды в среде сжиженного фреона // Радиоактивные отходы. 2025. № 2 (31). С. 60–68. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-2-60-68.

DEVELOPMENT AND TESTING OF AN EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR PROTECTIVE CLOSING DECONTAMINATION IN LIQUEFIED FREONS ENVIRONMENT

Korochkin E. I.¹, Nikolayev A. Y.¹, Myrzin A. A.¹, Mishina N. E.¹, Ryabkova N. V.¹,
Nikitin E. M.², Rybin A. N.², Semenov D. A.², Ermakov A. I.², Besspala E. V.³

¹ V. G. Khlopin Radium Institute JSC, Saint-Petersburg, Russia

² TVEL JSC, Moscow, Russia

³ Pilot and Demonstration Center for Decommissioning of Uranium-Graphite Nuclear Reactors JSC,
Seversk, Tomsk region, Russia

Article received on March 31, 2025

The article describes a prototype of a modular installation designed to decontaminate protective clothing in liquefied freons environment (further – Installation) and its design development process. It describes in detail the laboratory modelling stage implemented to identify the performance parameters of the process and to select a formulation for a most effective decontaminant. The prototype installation was manufactured at the laboratory stage of protective clothing decontamination in liquefied freons environment. It was assembled and tested at an actual radiochemical facility. A series of experiments has demonstrated the feasibility of further research with the obtained decontamination coefficients of up to 30 and 48 for α - and β -emitters respectively. In the future, the proposed waterless decontamination method is supposed to reduce the volumes of secondly radioactive waste by up to 300–400 times as compared to the commonly applied water decontamination approach.

Keywords: decontamination, waterless decontamination, fluid extraction, protective clothing, special laundry, liquefied gas, radioactive waste.

References

1. *Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.10.2003 No. 157 "O vvedenii v deystviye sanitarno-epidemiologicheskikh pravil i normativov SanPiN 2.2.8.46-03 "Sanitarnyye pravila po dezaktivatsii sredstv individual'noy zashchity" utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 26.10.2003 (Zaregistrovano v Minyuste RF 05.12.2003 No. 5298)* [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of October 28, 2003 No. 157 On the Introduction of Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations SanPiN 2.2.8.46-03 Sanitary Rules for the Decontamination of Personal Protective Equipment approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on October 26, 2003 (Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on December 5, 2003 No. 5298)]. Moscow, MORKNIGA Publ., 2020. 47 p.
2. Ryabchikov B. E. *Ochistka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Liquid Radioactive Waste Treatment]. Moscow, DeLi print Publ., 2009. 516 p.
3. *Patent No. 2274486 C2 Russian Federation, IPC B01D 59/24, G21F 9/28. Sposob ekstraktsii metallov* [Metal Extraction Method]: No. 2003113308/06: appl. on May 5, 2003: published on April 20, 2006 / V. A. Babain, V. V. Bondin, S. I. Bychkov et al. ; applicant – State Unitary Enterprise Scientific and Production Association V. G. Khlopin Radium Institute, Federal State Unitary Enterprise Mining and Chemical Combine.
4. Boufetacha M., Ayad A., Thiebault N. et al. Selective extraction of carnosic acid, carnosol, and rosmarinic acid from *Rosmarinus officinalis* L. using supercritical fluid and their antioxidant activity. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2024, vol. 212, p. 106344. DOI: 10.1016/j.supflu.2024.106344.
5. López-Hortas L., Rodríguez P., Díaz-Reinoso B. et al. Supercritical fluid extraction as a suitable technology to recover bioactive compounds from flowers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2022, vol. 188, p. 105652. DOI: 10.1016/j.supflu.2022.105652.
6. Meguro Y., Iso S., Yoshida Z. et al. Decontamination of uranium oxides from solid wastes by supercritical CO₂ fluid leaching method using HNO₃-TBP complex as a reactant. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2004, vol. 31, no. 2, pp. 141–147. DOI: 10.1016/j.supflu.2003.10.005.
7. Tueur A., Beziat A., Carles M. et al. Supercritical fluid extraction for cleaning with heavy metals and radionuclides. *4th Meeting on Supercritical Fluids*. I.N.S.A. Villeurbanne, France, 20–21 January 1997. Pp. 55–61.
8. Shadrin A. Yu., Murzin A. A., Shafikov D. N., Kamachev V. A. Deactivation of metals, fabrics and soils

in a liquid CO₂ medium. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2007, vol. 41, no. 5, pp. 786–792. DOI: 10.1134/S0040579507050594.

9. Samsonov M. D., Kulyako Y. M., Myasoedov B. F. et al. Sverkhkriticheskaia flyuidnaia ekstrakciia v sovremennoj radiohimii [Supercritical fluid extraction in modern radiochemistry]. *Radiokhimiya – Radiochemistry*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 111–122. DOI: 10.1134/S1066362211020019.

10. Shadrin A. Yu., Murzin A. A., Shafikov D. N. et al. Dezaktivatsiia metallov, tkaney i pochv v srede zhidkogo CO₂ [Decontamination of metals, fabrics and soils in liquid CO₂]. *Khimicheskaya Tekhnologiya – Chemical technology*, 2007, vol. 8, no. 3, pp. 134–140.

11. Shadrin A. Yu., Murzin A. A., Shafikov D. N., Kamachev V. A. Dezaktivatsiia v srede sverkhkriticheskikh

flyuidov i szhizhennykh gazov [Decontamination in the environment of supercritical fluids and liquefied gases]. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriia i praktika – Supercritical fluids: theory and practice*, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 40–47.

12. Kamachev V. A., Shadrin A. Yu., Murzin A. A., Shafikov D. N. Ekstraktsiia aktinoidov rastvorami neytral'nykh ekstragentov v sverkhkriticheskikh i szhizhennykh freonakh [Extraction of actinides with solutions of neutral extractants in supercritical and liquefied freons]. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriia i praktika – Supercritical fluids: theory and practice*, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 48–56.

13. Maksimov B. N., Barabanov V. G. *Promyshlennye ftororganicheskie produkty* [Industrial organofluorine products]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 464 p.

Information about the authors

Korochkin Egor Igorevich, Engineer of the 2nd category, V. G. Khlopin Radium Institute JSC (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: e.korochkin@khlopin.ru.

Nikolayev Artyom Yurievich, Researcher, V. G. Khlopin Radium Institute JSC (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: aniko-laev@khlopin.ru.

Murzin Andrey Anatolyevich, PhD in Chemical Sciences, Scientific Consultant, V. G. Khlopin Radium Institute JSC (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: aamurzin@khlopin.ru.

Mishina Nadezhda Evgenievna, PhD in Chemical Sciences, Head of the Laboratory, V. G. Khlopin Radium Institute JSC (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: mishina@khlopin.ru.

Ryabkova Nadezhda Valentinovna, PhD in Chemical Sciences, Head of the Department, V. G. Khlopin Radium Institute JSC (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: ryabkova@khlopin.ru.

Nikitin Eduard Mikhailovich, Director for Decommissioning and RW Management, TVEL JSC (49, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: emnikitin@tvel.ru.

Rybin Alexey Nikolaevich, Head of the Group, TVEL JSC (49, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: anrybin@tvel.ru.

Semenov Dmitry Andreevich, Head of the Department, TVEL JSC (49, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: dmiandrsemenov@tvel.ru.

Ermakov Alexander Ivanovich, PhD in Chemical Sciences, Leading Expert, TVEL JSC (49, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: aleivaerma-kov@tvel.ru.

Bespala Evgeny Vladimirovich, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Scientific and Technological Development, Innovations and Quality, Pilot and Demonstration Center for Decommissioning of Uranium–Graphite Nuclear Reactors JSC (a/z 654, BUT Seversk, Tomsk region, 636000, Russia), e-mail: bevl@dnrc.ru.

Bibliographic description

Korochkin E. I., Nikolayev A. Yu., Myrzin A. A., Mishina N. E., Ryabkova N. V., Nikitin E. M., Rybin A. N., Semenov D. A., Ermakov A. I., Bespala E. V. Development and testing of an experimental installation for protective closing decontamination in liquefied freons environment. *Radioactive Waste*, 2025, no. 2 (31), pp. 60–68. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-2-60-68. (In Russian).