DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-36-43 УДК 621.039

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ХИМИЧЕСКИ И РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОГО ГРУНТА

А. П. Варлаков[1], А. В. Германов[1], М. А. Маряхин[1], А. Г. Павлова[1], М. Ю. Каленова[2]

[1] **АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара», Москва**

[2] **Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва**

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.

В статье изложены результаты испытания на опытном стенде технологии очистки химически и радиоактивно загрязненных грунтов, относящихся к категории низкоактивных радиоактивных отходов (НАО) и материалов ограниченного использования, которые образуются при выводе из эксплуатации промышленной площадки ядерно и радиационно опасного объекта (ЯРОО). Приведены коэффициенты очистки грунта от радионуклидов и химических загрязнителей, а также основные параметры данного процесса, основанного на комбинации методов гидросепарации и последующей ультразвуковой обработки в растворах реагентов. Представлены технические предложения по обращению с исходным грунтом, вторичными радиоактивными отходами (РАО) и продуктами очистки.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, радиоактивно загрязненный грунт, гидросепарация, ультразвуковая обработка, реагентная обработка, химическое загрязнение, продукт очистки, коэффициент очистки.*

Одной из актуальных проблем ядерного наследия является обращение с радиоактивно и химически загрязненными грунтами, образующимися при выводе из эксплуатации ЯРОО и рекультивации площадок их размещения [1], [2].

Грунт, имеющий радиоактивное загрязнение ниже уровня отнесения к категории РАО [3] и выше уровня отнесения к материалам неограниченного использования [4], является материалом ограниченного использования, обращение с которым требует контроля и обоснования радиационной безопасности для персонала и населения. Грунт, содержащий химические загрязнители в большем количестве, чем предельно допустимые концентрации (ПДК) в почве [5], относится к промышленным отходам различного класса опасности в зависимости от количества и свойств загрязнителя.

В 2023 году была разработана технологическая схема очистки радиоактивно и химически загрязненного грунта промышленной площадки ЯРОО [6]. Для исследований были использованы пробы, загрязненные радионуклидами Am, Pu и U, являющиеся материалами ограниченного использования и имеющие превышение ПДК по химическим загрязнителям As, Cu, Zn.

Разработанная технология [6] предусматривает отделение методом гидросепарации фракции грунта менее 0,05 мм, содержащей более 60 % загрязняющих веществ от их общего содержания в грунте и плохо поддающейся дальнейшей очистке [7]—[9], и фракции 0,05—3 мм, имеющей значительно большую долю в общей массе грунта, а также ее ультразвуковую (УЗ) обработку в растворах карбоната натрия и серной кислоты, которая позволяет произвести ее очистку до

уровня загрязнения, соответствующего неограниченному использованию материалов.

Данный способ обеспечил сокращение объема химически и радиоактивно загрязненного грунта более чем в два раза.

В настоящей работе приводятся результаты стендовых испытаний технологии очистки грунта, ее основные технологические параметры, а также исходные данные для создания опытно-промышленной установки.

Исследования проводились на опытном стенде АО «ВНИИНМ», максимальная производительность которого по обрабатываемому грунту составляет 5 кг/ч [10].

Дезинтеграцию грунта в водной среде осуществляли механическим перемешиванием в смесителе при соотношении (грунт) : (вода) — 1 : 1.

Характеристики смесителя:

Объем, дм^3 16
Тип мешалки . . . . 4-лопастная, рамного типа
Угол наклона, град. 35
Частота вращения мешалки, об/мин 93

Пульпу грунта из смесителя направляли на механическую сепарацию, которая осуществлялась в блоке промывки, состоящем из трех прямоугольных наклонных сит, установленных друг над другом на вибростоле и оборудованных форсунками и поддонами. Там же производились промывка и отделение фракций более 0,7 мм. В последний поддон блока промывки поступала пульпа фракции с размером частиц менее 0,7 мм, которая через слив попадала в промежуточную емкость.

Затем она перемешивалась погружным насосом и подавалась в классификатор, предназначенный для разделения в водной среде пульпы на фракции менее 0,05 мм и 0,05—0,7 мм и включающий узкую ванну с наклонным желобом, спиральный шнек и его привод (мотор-редуктор).

Характеристики классификатора:

Наклон ложа спирали, град. 18
Высота столба жидкости, мм . . . 500

В результате обработки пульпы в классификаторе фракция 0,05—0,7 мм выгружалась шнеком через отверстие в верхней части ванны, а фракция менее 0,05 мм удалялась вместе с потоком воды через перелив в емкость осветлителя-сгустителя, представляющую цилиндрический сосуд диаметром 0,25 м, высотой 1 м, с коническим днищем. В нем фракция менее 0,05 мм смешивалась с раствором флокулянта. Из нижнего патрубка осветлителя-сгустителя суспензия мелкой фракции откачивалась в емкость сбора. Осветленная вода поступала в емкость оборотной воды, откуда направлялась насосом в блок промывки и классификатор.

Для очистки выделенных фракций грунта методом (УЗ) и реагентной обработки применялась ванна VBS-DS.

Характеристики УЗ ванны:

Объем, л 6
Мощность УЗ/нагрев, Вт. 180/300
Размеры внутренние, Д × Ш × Г, см . . .30 × 15 × 15
Температура нагрева, °С. . . . . до 100
Регулировка мощности, %. . . . . 5—100
Таймер, мин . . . . . 1—99
Рабочие частоты, кГц 28/40/68

В качестве реагентов для УЗ-обработки грунта были использованы растворы карбоната натрия (10 г/л) и серной кислоты (от 25 до 40 г/л) [6], а также азотной кислоты (50 г/л).

Для стендовых испытаний УЗ-очистки фракций грунта более 0,05 мм в растворах реагентов предварительно были подобраны технологические параметры (время обработки, частота и удельная мощность ультразвукового излучения). Для этого была проведена их обработка в воде в режиме с варьируемой частотой (28/40/68 кГц) и удельной мощностью (75 и 100 Вт/кг) ультразвука. Соотношение (твердое) : (жидкость) — 1 : 2. Время обработки, необходимое для отделения фракции менее 0,05 мм, определяли экспериментально. Для этого каждые 20 минут из емкости отбирали материал, отделяли на сите фракцию менее 0,05 мм. Время УЗ-обработки считали достаточным, если ее содержание не превышало 0,1 мас.%. При оптимальных параметрах, обеспечивающих максимальную степень очистки грунта, были проведены испытания в растворах реагентов.

Для стендовых испытаний использовали три партии проб грунта, в которых были определены гранулометрический, радионуклидный и химический составы грунта и их гранулометрических фракций.

В связи с различной морфологией гранулометрический состав партий грунта значительно различался. Для партий №1, 2 и 3 содержание фракции менее 0,05 мм составило 9, 17, 58 мас.% соответственно; 0,05–0,7 мм — 76, 54, 34 мас.%; 0,7–3 мм — 13, 19, 4 мас.%; более 3 мм — 2, 9, 3 мас.%. Таким образом, за счет выделения фракций грунта от 0,05 до 3 мм и их очистки до уровня содержания загрязнителей ниже ПДК и вывода из категории РАО коэффициент сокращения объема химически и радиоактивно загрязненного грунта исследованных партий может достичь для № 1, 2 и 3 — 8,8; 3,8; 1,6 соответственно.

С целью уточнения параметров технологии стендовые испытания по УЗ-очистке грунта в растворах реагентов были проведены для фракций 0,05—0,7 мм и 0,7—3 мм раздельно.

Таблица 1. Радионуклидный состав исходных партий грунта, фракций 0,05–0,7 мм и 0,7–3 мм

Загрязнитель	Удельная активность радионуклидов в партиях, Бк/кг								
	Партия № 1			Партия № 2			Партия № 3		
	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм
^{234}Th	530±42	148±34	100±8	66±10	96±36	127±27	78±14	–**	–**
^{232}Th	10±1	–*	–	18±3	6±1	20±2	35±5	–	–
^{228}Th	10±2	14±2	7±2	16±2	6±1	19±5	33±7	–	–
^{226}Ra	13±2	12±1	11±1	16±2	8±1	22±2	24±3	–	–
^{40}K	245±23	150±20	320±30	250±28	204±18	470±50	480±50	–	–
^{241}Am	7750±930	915±60	1770±142	305±29	<25	64±15	–	–	–
^{241}Pu	1700±310	400±30	800±110	–	–	–	–	–	–
$^{239+240}$Pu	5650±790	2200±300	1950±200	–	–	–	–	–	–
^{238}Pu	350±50	240±40	200±25	–	–	–	–	–	–
^{235}U	17±3	–	15±2	–	–	–	–	–	–

* ниже предела обнаружения;
** не определяли, так как содержание природных радионуклидов сходно с партией № 2, техногенных радионуклидов нет.

Таблица 2. Химический состав исходных партий грунта, фракций 0,05–0,7 мм и 0,7–3 мм

Загрязнитель	ПДК [5], мг/кг		Содержание загрязнителя в партиях, мг/кг								
			Партия № 1			Партия № 2			Партия № 3		
	песок*	суглинок**	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм	исходный грунт	0,05–0,7 мм	0,7–3 мм
As	2	10	3,4	1,2	1,62	10,9	3,0	3,38	10,4	4,11	6,5
Cd	0,5	2	0,1	0,13	0,17	1,96	0,5	4,8	0,43	0,35	1,4
Cu	33	132	9,8	6,12	9,8	97,4	18,2	137	44,5	48,9	150
Ni	20	80	10,5	5,67	10,8	29,5	9,67	31	39	15,7	55,7
Pb	32	130	13,5	4,08	7,66	36	15,8	28,5	71,5	149	50,7
Zn	55	220	29	12,6	17,9	247	52,5	123	2602	267	2017
Hg	2,1		3,8	3,8	<0,2	1,6	<0,2	<0,2	1,75	0,82	1,4
BeO	3,0		1,3	1,3	1,45	2,2	1,34	5,25	4,1	2,29	15
U	0,015***		27,9	27,9	6,72	3,1	2,89	5,1	3,9	2,76	1,46

* для грунтов типа «песок, супесь» партий № 1 и 2;
** для грунтов типа «глина, суглинок» партии № 3;
*** для воды поверхностных водоемов и питьевой воды, мг/дм^3.

В табл. 1 представлен радионуклидный состав партий грунта и их гранулометрических фракций.

Как видно из табл. 1, по содержанию трансурановых радионуклидов (Am, Pu) партия грунта № 1 относится к категории низкоактивных отходов (НАО), партия № 2 — к материалам ограниченного использования, партия № 3 — неограниченного использования (радиоактивное загрязнение в партии № 3 не обнаружено).

В табл. 2 представлен химический состав партий грунта и их гранулометрических фракций.

В соответствии с [11], [12] грунт всех партий по химическому загрязнению относится к отходам IV класса опасности.

Как видно из табл. 2, содержание химических загрязнителей в партии грунта № 1 превышает ПДК для As и Hg, в партии № 2 — для As, Cd, Cu, Ni, Pb и Zn, в партии № 3 — для As, Cu, Ni, Pb, Zn и BeO.

В табл. 3 представлено распределение Am и Pu по фракциям партий грунта.

Распределение Am и Pu по партиям грунта имеет схожий характер — максимальная доля активности (около 90 %) приходится на фракцию менее 0,05 мм, а минимальная (около 10 %) — на фракции 0,05—0,7 мм и 0,7—3 мм. При этом можно отметить, что общее содержание радиоактивных загрязнителей во фракции 0,05—0,7 мм ниже по сравнению с фракцией 0,7—3 мм.

Таблица 3. Распределение* Am *и* Pu *по фракциям партий грунта

Номер партии	Фракция, мм	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
		^{241}Am	^{241}Pu	$^{239+240}$Pu	^{238}Pu
1	0,7–3	1 770 ± 142	800 ± 110	1 950 ± 200	200 ± 25
	0,05–0,7	915 ± 60	400 ± 30	2 200 ± 300	240 ± 40
	<0,05	36 980 ± 5 180	19 700 ± 5 300	58 700 ± 11 700	2 500 ± 580
	растительные остатки	1 660 ± 150	–*	–	–
2	0,7–3	64 ± 15	–	–	–
	0,05–0,7	<25*	–	–	–
	<0,05	1 020 ± 70	–	–	–
	растительные остатки	950 ± 100	–	–	–

* ниже предела обнаружения.

Для стендовых испытаний очистки фракций грунта в растворах реагентов использовались параметры УЗ-обработки, обеспечивающие наибольшие коэффициенты очистки:

- время обработки — 60 мин;
- частота — 40 кГц;
- удельная мощность — 100 Вт/кг.

Максимальная степень очистки партий грунта получена при УЗ-обработке в растворе серной кислоты (25 г/л). Коэффициенты очистки от ^{241}Am и изотопов Pu для фракции 0,05—0,7 мм составили 7 и 3—20 в разных партиях, для 0,7—3 мм — 11 и 1,7—2,2 соответственно. При очистке фракций 0,05—0,7 мм и 0,7—3 мм УЗ-обработкой в растворе серной кислоты (25 г/л) достигнуто снижение химического загрязнения до уровня ниже ПДК для всех партий грунта. Коэффициент очистки для всех химических загрязнителей составил 1,5—3.

По результатам испытаний выявлено, что коэффициенты очистки фракций 0,05—0,7 мм и 0,7—3 мм в растворах реагентов отличаются незначительно (не более чем в 2 раза), поэтому целесообразно проводить очистку объединенной фракции грунта от 0,05 до 3 мм. Данная технология обеспечит уровень химического загрязнения во всех партиях ниже ПДК и вывод грунта из категории РАО.

В табл. 4 представлены коэффициенты очистки фракции 0,05—3 мм от радионуклидов и химических загрязнителей на разных стадиях для всех партий грунта.

В табл. 5 приведены параметры технологической схемы очистки грунта.

Схема комплексной технологии очистки грунта предусматривает выделение фракции 0,05—3 мм методом гидросепарации и ее последующую УЗ-обработку в растворе серной кислоты (25 г/л).

Состав вторичных отходов очистки грунта от загрязняющих веществ и радионуклидов:

Таблица 4. Коэффициенты очистки фракции 0,05—3 мм на разных стадиях обработки

Партия №	Радионуклиды			
	^{241}Am	^{241}Pu	$^{239+240}$Pu	^{238}Pu
На стадии гидросепарации				
1	7,4	3,7	2,6	1,5
2	8,7	–	–	–
На стадии УЗ-обработки в растворе серной кислоты				
1	7,3	2,7	3,9	6,7
Суммарные коэффициенты, партия № 1				
	54	10		

	Химические загрязнители							
	As	Hg	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	BeO
1	2,7	1,2	–	–	–	–	–	–
2	3,5	–	1,2	2,0	1,9	1,9	3,5	–
3	2,4	–	–	1,1	1,9	1,1	5,7	1,1
На стадии УЗ-обработки в растворе серной кислоты								
1	1,5	16	–	–	–	–	–	–
2	2,2	–	2,1	1,1	2,3	1,1	2,0	
3	2,6	–	–	1,6	2,9	2,5	11	2,6
Суммарные коэффициенты								
1	3,9	19	–	–	–	–	–	–
2	7,9	–	2,5	1,1	4,4	1,6	6,9	–
3	6,1	–	–	1,2	5,6	1,3	60	2,9

Таблица 5. Параметры технологической схемы очистки грунта

Показатель	Значение
Время диспергирования грунта в воде, мин	10
Длительность и интенсивность ультразвуковой обработки на стадии реагентной доочистки	60 мин, 40 кГц, 100 Вт/кг
Тип и концентрация флокулянта	«Praestol 655 BC» 4—5 г/кг
Тип реагентной добавки, концентрация раствора реагента, время обработки, соотношение грунта и раствора реагента	раствор серной кислоты (25 г/л, 1 час, 1 : 1)
Кратность использования оборотных растворов реагентов	2

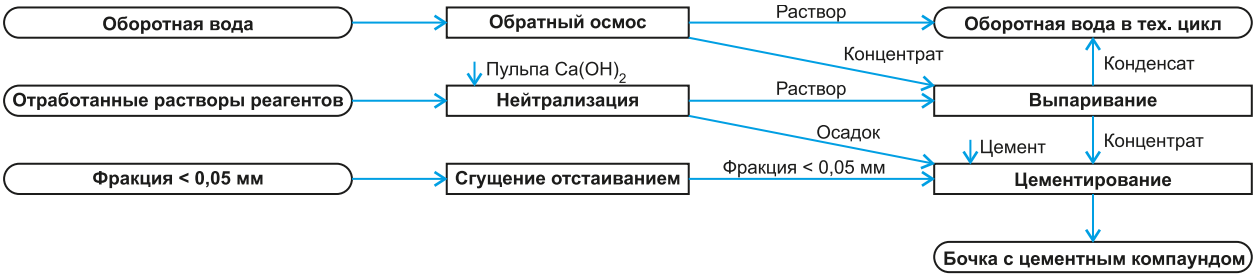

Рис. 1. Схема обращения со вторичными отходами

- фракция менее 0,05 мм;
- отработанная оборотная вода;
- отработанные растворы реагентов.

Схема обращения со вторичными отходами после применения данной технологии на промышленной площадке ЯРОО приведена на рис. 1.

Фракция менее 0,05 мм образуется для разных партий в количестве 0,1—0,5 т на 1 т переработанного грунта и может быть кондиционирована методом цементирования. Было установлено, что максимальное наполнение цементного компаунда фракцией менее 0,05 мм возможно в диапазоне от 19 до 21 мас.% при растворцементном отношении (Р/Ц) от 0,9 до 1,1 (прочность на сжатие составила 15—20 МПа на 28 сутки твердения).

В контуре гидросепарации используется оборотная вода. Ее расход составляет 1 м^3 на 1 т переработанного грунта. В случае накопления химических и радиоактивных загрязнений ее необходимо периодически заменять. Она может быть очищена комбинацией мембранных методов (обратный осмос). При этом очищенную воду (пермеат) возвращают в технологический цикл, а воду с концентрированными загрязнениями направляют на выпаривание (в расчетах принято солесодержание 400 г/дм^3). Затем концентрат может быть зацементирован совместно с фракцией грунта менее 0,05 мм.

Отработанные растворы реагентов образуются в количестве 0,4—0,5 м^3 на 1 т грунта и направляются на нейтрализацию. Полученный осадок объединяют с фракцией грунта менее 0,05 мм. Рекомендуемый способ переработки осветленного раствора — упаривание до солесодержания 400—600 г/дм^3 и совместное цементирование с фракцией менее 0,05 мм, в результате чего образуется 0,2—0,5 м^3 цементного компаунда на 1 т грунта. После цементирования вторичных отходов объем РАО сокращается в 1,8—2,3 раза.

Заключение

Для проведения стендовых испытаний технологии очистки радиоактивно и химически загрязненного грунта были использованы партии, относящиеся к категории НАО и материалов ограниченного использования и имеющие превышение ПДК по химическим загрязнителям As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, BeO.

Стендовые испытания проводились при оптимальных технологических параметрах УЗ-обработки: время — 60 минут, частота — 40 кГц, удельная мощность — 100 Вт/кг.

Экспериментально показано, что после гидросепарации и УЗ-обработки целевой фракции 0,05—3 мм в растворе серной кислоты (25 г/л) достигнуты следующие коэффициенты очистки: по ^{241}Am — 54,3; ^{241}Pu — 10,2; $^{239+240}$Pu — 10,2; ^{238}Pu — 10,3; As — 3,8—7,8; Cu — 1—1,2; Zn — 3,9—60,4; BeO — 1,2—2,9.

Отмечается сокращение объема химически и радиоактивно загрязненного грунта в 3 раза за счет выделения и очистки фракции грунта 0,05—3 мм до уровня содержания загрязнителей ниже ПДК и вывода ее из категории РАО.

С учетом увеличения объема вторичных отходов после цементирования сокращение объема РАО составило 2,3 раза.

Следующим этапом работ является создание опытно-промышленной установки очистки радиоактивно и химически загрязненного грунта промышленной площадки ЯРОО.

Литература

1. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. / Под общ. ред. Е. В. Евстратова, А. М. Агапова, Н. П. Лаверова, Л. А. Большова, И. И. Линге. Т. 1. — М. : «Энергопроманалитика», 2010. 376 с.

2. *Варлаков А. П., Германов А. В., Марякин М. А., Варлакова Г. А.* Технология дезактивации радиоактивно загрязненного грунта // Аналитика. 2018. Т. 8. № 1 (38). С. 46—50. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.38.1.46.50.

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 года № 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» с изм., утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 г. № 1929.

4. *Романович И. К., Балонов М. И., Барковский А. Н. и др.* Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) : Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. — М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, 2010. 83 с.

5. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. — М. : Минздрав России, 2021. 469 с.

6. *Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А. и др.* Выбор технологической схемы очистки радиоактивно и химически загрязненного грунта // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 26—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-26-37.

7. *Дмитриев С. А., Баринов А. С., Купцов В. М.* Реагентная дезактивация мелкодисперсной фракции грунтов // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 6. С. 565—567.

8. *Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А. и др.* Дезактивация грунта, загрязненного ураном, с использованием метода гидросепарации с последующей реагентной обработкой фракций // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 85—90. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-85-90.

9. *Radu D. A., Woinaroschy A., Panturu E., Isopescu R.* Experimental design and process optimization for uranium polluted soils decontamination by acid washing // Water, Air, & Soil Pollution. 2015. Vol. 226. Article number 127. DOI: 10.1007/s11270-015-2351-4.

10. *Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А., Варлакова Г. А.* Разработка технологии дезактивации радиоактивно загрязненных грунтов и установки для ее реализации // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2017. № 3 (90). С. 100—107.

11. Критерии отнесения отходов к I—V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду. — М. : МПР России, 2014.

12. Методическое пособие по применению «Критериев отнесения опасных отходов к классам опасности для окружающей природной среды». — М. : ФГУ «ЦЭКА», 2003. 38 с.

Информация об авторах

Варлаков Андрей Петрович, доктор технических наук, директор отделения, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Германов Александр Владимирович, кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

Маряхин Михаил Андреевич, ведущий эксперт, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: MAMaryakhin@bochvar.ru.

Павлова Анастасия Григорьевна, инженер-технолог 2-й категории, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: AnGPavlova@bochvar.ru.

Каленова Майя Юрьевна, кандидат технических наук, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: MYKalenova@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А., Павлова А. Г., Каленова М. Ю. Стендовые испытания технологии очистки химически и радиоактивно загрязненного грунта // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30). С. 36—43. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-36-43.

BENCH TESTS OF A CLEANUP METHOD FOR CHEMICALLY AND RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOILS

Varlakov A. P.[1], Germanov A. V.[1], Maryakhin M. A.[1], Pavlova A. G.[1], Kalenova M. Yu.[2]

[1]JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials", Moscow, Russia

[2]Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on December 27, 2024

The article summarizes the results of a bench test exploring treatment methods for chemically and radioactively contaminated soils referred to low-level waste (LLW) and restricted use materials resulting from the decommissioning of an industrial site at a nuclear-radiation hazardous facility (NRHF). The article presents the soil cleanup coefficients for radionuclides and chemical contaminants, as well as the main parameters of the treatment approach based on a combination of hydroseparation methods and subsequent ultrasonic soil treatment in reagent solutions. It also provides technical proposals on how the original soil, secondary radioactive waste and treatment products should be managed.

Keywords: *radioactive waste, radioactively contaminated soil, hydroseparation, ultrasonic treatment, reagent treatment, chemical contamination, treatment product, cleanup coefficient.*

References

1. *Problemy yadernogo naslediya i puti ikh resheniya* [Nuclear Legacy Challenges and Ways to Address Them]. Edited by E. V. Evstratov, A. M. Agapov, N. P. Laverov, L. A. Bolshov, I. I. Linge. Vol. 1. Moscow, Energopromanalitika Publ., 2010. 376 p.

2. Varlakov A. P., Germanov A. V., Maryakhin M. A., Varlakova G. A. Tekhnologiya dezaktivatsii radioaktivno zagryaznennogo grunta [The Technology of Decontamination of Radioactively Contaminated Soil]. *Analitika — Analytics,* 2018, vol. 8, no. 1 (38), pp. 46—50. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.38.1.46.50.

3. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2012 No. 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov 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 October 19, 2012 No. 1069 On criteria used to categorize solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for radioactive waste categorization as non-removable radioactive waste or removable radioactive waste, and classification criteria for removable radioactive waste]. With Amendments approved by the Government Decree of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929.

4. Romanovich I. K., Balonov M. I., Barkovsky A. N. et al. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (OSPORB 99/2010): Sanitarnye pravila i normativy SP 2.6.1.2612-10* [Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB 99/2010): Sanitary rules and regulations SP 2.6.1.2612-10]. Moscow, Federal'nyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Publ., 2010. 83 p.

5. *SanPiN 1.2.3685-21. Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for human]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 2021. 469 p.

6. Varlakov A. P., Germanov A. V., Maryakhin M. A. et al. Vybor tekhnologicheskoy skhemy ochistki radioaktivno i khimicheski zagryaznennogo grunta [Selection of an Operational Flow for Radioactively and Chemically Contaminated Soil Treatment]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2024, no. 2 (27), pp. 26—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-26-37.

7. Dmitriev S. A., Barinov A. S., Kuptsov V. M. Reagentnaya dezaktivatsiya melkodispersnoy fraktsii gruntov [Reagent Decontamination of The Finely Dispersed Fraction of Soils]. *Radiokhimiya — Radiochemistry,* 2011, vol. 53, no. 6, pp. 669—672. DOI: 10.1134/S1066362211060178.

8. Varlakov A. P., Germanov A. V., Mariakhin M. A. et al. Dezaktivatsiya grunta, zagryaznennogo uranom, s ispol'zovaniyem metoda gidroseparatsii s posleduyushchey reagentnoy obrabotkoy fraktsiy [Decontamination of Soil Contaminated by Uranium Using Hydroseparation Method with Further Reagent Treatment of Fractions]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 85—90. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-85-90.

9. Radu D. A., Woinaroschy A., Panturu E., Isopescu R. Experimental design and process optimization for uranium polluted soils decontamination by acid washing. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, vol. 226, article number 127. DOI: 10.1007/s11270-015-2351-4.

10. Varlakov A. P., Germanov A. V., Maryakhin M. A., Varlakova G. A. Razrabotka tekhnologii dezaktivatsii radioaktivno zagryaznennykh gruntov i ustanovki dlya yeye realizatsii [Development of Technology and Installation for Soil Decontamination by Hydroseparation Method]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedeniye i novyye materialy — Issues of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials,* 2017, no. 3 (90), pp. 100—107.
11. *Kriterii otneseniya otkhodov k I—V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Criteria for waste assignment to hazard classes I—V according to the degree of negative environmental impact]. Moscow, MPR Rossii Publ., 2014.
12. *Metodicheskoye posobiye po primeneniyu "Kriteriyev otneseniya opasnykh otkhodov k klassam opasnosti dlya okruzhayushchey prirodnoy sredy"* [Methodological guidelines supporting the application of the Criteria for Hazardous Waste Assignment by Environmental Hazard Classes]. Moscow, FGU TSEKA Publ., 2003. 38 p.

Information about the authors

Varlakov Andrey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Director of the Department, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Germanov Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

Maryakhin Mihail Andreevich, Leading Expert, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: MAMaryakhin@bochvar.ru.

Pavlova Anastasia Grigoryevna, process engineer, category 2, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: AnGPavlova@bochvar.ru.

Kalenova Maya Yurievna, Candidate of Technical Sciences, Project Manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: MYKalenova@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Varlakov A. P., Germanov A. V., Maryakhin M. A., Pavlova A. G., Kalenova M. Yu. Bench tests of a cleanup method for chemically and radioactively contaminated soils. *Radioactive Waste,* 2025, no. 1 (30), pp. 36—43. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-36-43. (In Russian).