DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-8-16 УДК 621.039.73

ЦЕМЕНТИРОВАНИЕ ЖРО В ВИДЕ ШЛАМА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИИ — ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОКРАЩЕНИЮ ОБЪЕМОВ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ ОТХОДОВ АЭС

А. П. Варлаков[1], А. В. Германов[1], М. А. Маряхин[1], А. Г. Павлова[1], О. В. Корнюшкина[2], А. В. Матвеенко[2], А. А. Кащенко[2], С. С. Петров[3]

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

[2]**АО «Концерн Росэнергоатом», Москва**

[3]**АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва**

Статья поступила в редакцию 23 июня 2026 г.

Статья посвящена вопросам кондиционирования жидких радиоактивных отходов АЭС в виде шлама. Рассмотрены методы его цементирования при использовании различных вяжущих и способов приготовления цементного компаунда. Приведены основные параметры разных технологий, а также коэффициенты изменения объема конечного продукта. Представлены результаты исследования метода баротермического цементирования, заключающегося в синтезе цементного компаунда в условиях повышенных температуры и давления. Показано, что технология обращения с ЖРО в виде шлама на основе данного метода имеет значительно более эффективные технико-экономические показатели.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, цементирование, шлам, горячее прессование, баротермическая обработка, шлак.*

Для кондиционирования радиоактивных отходов (РАО) широко применяется метод цементирования благодаря возможности получения конечного продукта требуемого качества без высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

Шлам как гетерогенная смесь, содержащая слабый водный солевой раствор, минеральный и химический осадки, сорбенты, является сложным для прямого традиционного цементирования (смешивания компонентов цементного компаунда в смесителе без последующей обработки) отходом. Помимо вредного влияния растворенных в воде солей на гидратацию и твердение обычного портландцемента, осадки повышают вязкость цементного раствора, что требует увеличения содержания в нем воды на 30—70 мас.% до водоцементного отношения свыше 0,8 для придания необходимой растекаемости при перемешивании (не менее 150 мм). Применение в этих целях пластификаторов, используемых в строительной отрасли, часто неэффективно из-за физико-химических свойств шлама. Повышенное количество воды увеличивает пористость цементного компаунда и, соответственно, ухудшает все регламентированные [1] (прочность, водо-, морозо-, радиационная стойкость) и другие важные свойства. Без предварительной обработки, специальных

цементных композиций и оборудования шлам цементируется трудно и включается в конечный продукт в малом количестве. Для шламов, образующихся на АЭС, отсутствуют эффективные технологии переработки и кондиционирования. В настоящее время они накапливается в емкостном оборудовании различных систем без переработки.

Для увеличения степени включения некоторых видов РАО в цементный компаунд перспективным является способ горячего изостатического прессования (ГИП) [2]. Синтез матриц путем ГИП представляет собой одновременное механическое прессование и термическую обработку цементной смеси в герметичной металлической капсуле (контейнере), которая обеспечивает уплотнение материала во время обработки и служит дополнительным барьером для безопасного хранения.

Метод ГИП цементного компаунда с имитатором ЖРО с солесодержанием 545 г/л, приготовленного при водоцементном отношении 0,1—0,3, позволил получить плотную матрицу с равномерной структурой по всему объему. Прочность цементных компаундов на 28 сутки твердения составила до 115 МПа, скорость выщелачивания ^{137}Cs — 10^{-7}—10^{-6} г/(см^2·сут.), что сравнимо с характеристиками стеклоподобных и керамических матриц.

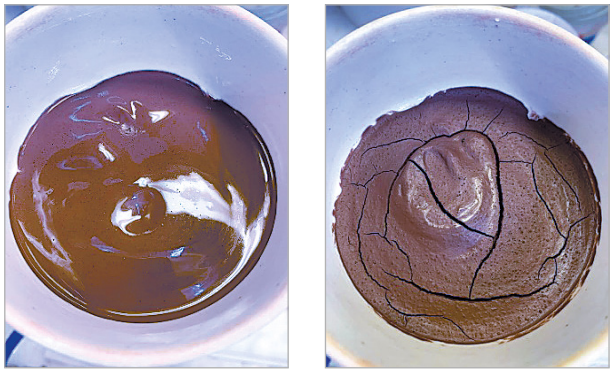
В основе повышения качества цементного компаунда лежит значительное снижение его пористости при низких водоцементных отношениях и принудительном уплотнении, что в значительной мере и улучшает все его регламентированные свойства.

В настоящих исследованиях была преимущественно использована шлакощелочная вяжущая система, включающая молотый доменный гранулированный шлак и щелочной активатор (NaOH и др.). В работах, посвященных данным материалам, отмечается, что в результате гидратации и твердения такой вяжущей системы в условиях малого содержания воды происходит образование прочной каркасной кристаллической структуры в ходе реакции поликонденсации алюмосиликатных соединений в сильнощелочной среде [3].

Кроме того, механизм гидратации шлаков значительно отличается от гидратации портландцементов. Он менее подвержен вредному влиянию растворимых сульфатов, хлоридов и боратов. Доказано, что в шлакощелочных вяжущих системах значительно снижается выщелачивание Cs и Sr, вероятно, за счет образования нерастворимых щелочных гидроалюмосиликатов.

Для определения технологии, позволяющей значительно увеличить содержание шламов в конечном продукте, были исследованы в сравнении следующие методы:

1) прямое цементирование шламов с различной влажностью, подготовленных, соответственно, двумя методами: отстаивание и вакуумная фильтрация (рис. 1);



а **б**

Рис. 1. Шлам после отстаивания (а) и вакуумной фильтрации (б)

2) цементирование шлама, подготовленного вакуумной фильтрацией, методом горячего прессования в герметичном контейнере;

3) цементирование шлама, подготовленного вакуумной фильтрацией, методом вибропрессования с последующей термообработкой паром под давлением в герметичном контейнере (баротермическая обработка).

Для исследований были отобраны пробы из емкостного оборудования системы обращения с трапной водой Нововоронежской АЭС (НВАЭС) (8 единиц) и опытно-демонстрационного инженерного центра по выводу из эксплуатации блоков с водо-водяными энергетическими реакторами (ОДИЦ ВВЭР) (8 единиц). Для отбора проб шлама с различной глубины применялись изготовленные АО «ВНИИНМ» оригинальные ручные пробоотборные устройства.

Для исследований формировались представительные пробы с усредненными радиационными и физико-химическими характеристиками для каждой емкости, шлам с разной глубины был смешан в одинаковых пропорциях. Диапазоны химического, радионуклидного и гранулометрического состава, а также морфологические характеристики усредненных высушенных проб для ОДИЦ ВВЭР и НВАЭС представлены в табл. 1—3. Пробы шлама ОДИЦ ВВЭР и НВАЭС, подготовленные вакуумной фильтрацией, имели плотность 0,94—1,36 кг/дм^3 и 0,7—1,36 кг/дм^3 и содержание воды в них составляло 35,5—51,4 мас.% и 34,6—63,6 мас.% соответственно.

Таблица 1. Химический состав (основные компоненты) усредненных проб шлама

Химический компонент	Концентрация, масс.%	
	ОДИЦ ВВЭР	НВАЭС
Натрий	3,1–6,0	0,3–10,0
Калий	0,2–0,9	0,2–7,6
Магний	0,8–3,4	0,2–2,3
Кальций	9,0–25,5	10,3–20,5
Медь	0,1–1,8	0,1–2,4
Железо (гидроксид железа (III))	4,2–58,4	6,7–28,2
Хлориды	0,3–7,1	0,1–5,4
Сульфаты	1,6–12,7	0,3–3,4
Карбонаты	7,9–31,5	24,2–57,0
Фосфаты	8,4–34,5	0,5–13,9
Борная кислота	0,6–3,1	0,9–34,2

Таблица 2. Радионуклидный состав (основные компоненты) усредненных проб шлама

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг	
	ОДИЦ ВВЭР	НВАЭС
^{54}Mn	$1{,}0\cdot10^{2}$–$1{,}7\cdot10^{2}$	$1{,}0\cdot10^{5}$–$7{,}0\cdot10^{5}$
^{60}Co	$4{,}1\cdot10^{3}$–$7{,}5\cdot10^{4}$	$3{,}0\cdot10^{5}$–$1{,}5\cdot10^{6}$
^{63}Ni	$2{,}8\cdot10^{5}$–$1{,}1\cdot10^{7}$	$1{,}4\cdot10^{5}$–$7{,}6\cdot10^{5}$
^{125}Sb	$<1{,}0\cdot10^{2}$	$1{,}0\cdot10^{2}$–$2{,}3\cdot10^{6}$
^{134}Cs	$1{,}0\cdot10^{1}$–$5{,}5\cdot10^{3}$	$1{,}0\cdot10^{1}$–$9{,}6\cdot10^{5}$
^{137}Cs	$1{,}6\cdot10^{6}$–$1{,}8\cdot10^{7}$	$1{,}8\cdot10^{4}$–$1{,}5\cdot10^{7}$

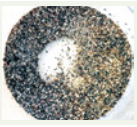
Из табл. 1—3 видно, что диапазон изменения содержания химических компонентов, радионуклидов и гранулометрического состава шламов весьма велик для разных единиц оборудования как на Нововоронежской АЭС, так и в ОДИЦ ВВЭР. Однако при анализе всех видов шлама по составу и количеству для каждого объекта было отмечено, что большинство шламов Нововоронежской АЭС содержит большее количество ИОС и воды. Для оптимизации исследований и определения общих тенденций, позволяющих прогнозировать свойства цементных компаундов, пробы шлама были разделены на две категории в соответствии с их физико-химическими свойствами и морфологическим составом. Для исследований были использованы усредненные пробы шлама двух видов, которые были сформированы путем смешивания представительных проб шлама, отнесенных к одному из видов, в равной пропорции.

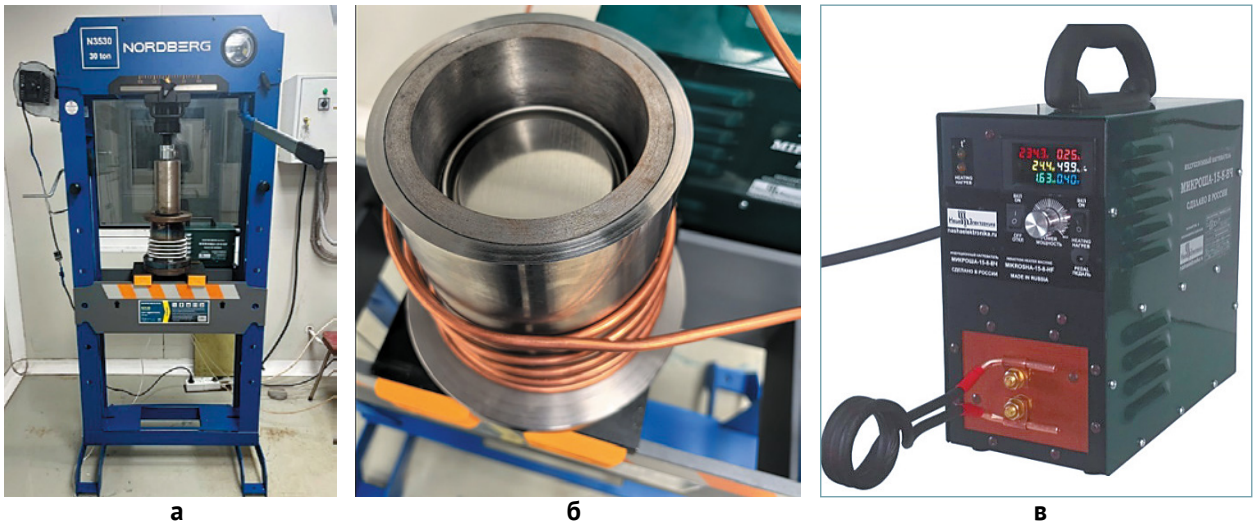
Характеристики усредненных проб шлама, подготовленных вакуумной фильтрацией:

- для первого вида шлама плотность составила 1,15 г/см^3 с содержанием твердой фазы 56,8 мас.%;
- для второго вида шлама плотность составила 0,96 г/см^3 с содержанием твердой фазы 48,3 мас.%.

В исследованиях были использованы следующие материалы: цемент марки CEM I 52.5 N (ГОСТ Р 57293 [4]); шлак доменный гранулированный молотый (СТО 99126491-22-2023 [5]);

Таблица 3. Гранулометрический состав и морфологические характеристики усредненных проб шлама

Фракция, мм	ОДИЦ ВВЭР	НВАЭС	Морфология		
	масс.%		описание	ОДИЦ ВВЭР	НВАЭС
менее 0,05	26,1–81,5	11,0–71,1	глинистые, илистые частицы		
0,05–0,20	4,8–14,5	2,7–17,8	песчаные частицы		
0,20–1,25	8,3–48,6	3,6–77,6	песчаные частицы, зерна ионообменной смолы (ИОС)		
1,25–3,00	1,5–12,5	0,5–7,6	песчаные частицы, зерна ИОС, фрагменты углеподобных материалов		
более 3,00	0,3–11,5	0,6–15,9	фрагменты строительных материалов, солевые осадки		



а б в

Рис. 2. Состав установки для горячего прессования

суперпластификатор марки С-3 (ГОСТ 24211 [9]); а также активаторы твердения для шлака — натр едкий технический (NaOH) [6], метасиликат натрия (Na_2SiO_3) [7] и натрий углекислый (Na_2CO_3) [8].

При прямом цементировании шлам смешивали с вяжущим материалом, добавками и дополнительной водой для обеспечения растекаемости цементного раствора не менее 150 мм, принятой как минимально возможной для его приготовления в емкостном смесителе с мешалкой. Содержание шлама (по сухой твердой фазе) варьировали в диапазоне 10—20 мас.% при водоцементном отношении 0,7—0,8.

При цементировании шлама методом ГИП смесь (цемент, добавки, шлам) помещалась в контейнер, уплотнялась вибрацией и подпрессовкой, контейнер герметизировался и прессовался при одновременном нагревании.

Для этих целей была изготовлена стендовая установка. В ее состав входили следующие элементы (рис. 2): пресс гидравлический (а); пресс-форма для размещения контейнера с цементной смесью (б); индукционный нагреватель (в).

Контейнер (рис. 3а) заполняли цементной смесью, герметизировали и прессовали (рис. 3б) на 5—10 об.% при одновременном нагревании.

На 7-е сутки после горячего прессования контейнер вскрывали и извлекали компаунд. Для определения регламентированных свойств его разрезали на образцы в форме кубика с размером ребра 20 мм (рис. 4).

В экспериментах планировали варьировать: температуру обработки от 100 °С до 140 °С; ее время от 1 до 6 часов и состав цементного компаунда. Были проведены предварительные эксперименты и получены образцы с содержанием шлама 20—30 мас.% по твердой фазе. Их прочность на сжатие составила 20—30 МПа.

а б

Рис. 3. Контейнеры с цементной смесью до (а) и после горячего прессования (б)

Рис. 4. Образцы цементного компаунда в форме кубика с размером ребра 20 мм после горячего прессования

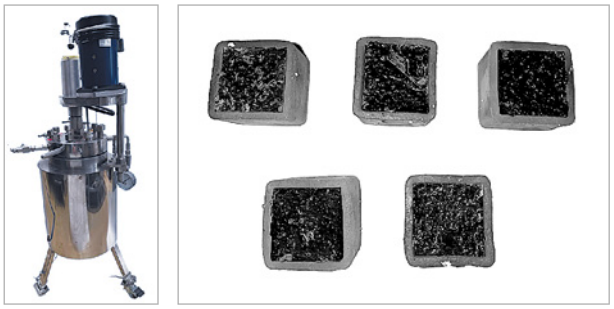
Однако при подготовке смесей на основе приготовленного вакуумной фильтрацией шлама и вяжущего были выявлены особенности уплотнения материала. По достижении цели — увеличении содержания шлама по твердой фазе в цементном компаунде свыше 40 мас.%, смесь приобретала некоторую пластичность при вибропрессовании, могла уплотняться и дополнительная подпрессовка не уменьшала значительно объем смеси. По этой причине в качестве альтернативы методу ГИП, с целью упрощения технологии и повышения наполнения цементного компаунда РАО, основной для исследований была выбрана схема цементирования шлама,

включающая вибропрессование смеси в контейнере, его герметизацию и нагревание в сушильном шкафу (рис. 5а) для термообработки паром под давлением (баротермическая обработка).

В экспериментах варьировали температуру обработки от 100 °С до 140 °С, ее время от 1 до 6 ч, тип активатора шлака: NaOH, Na_2SiO_3, Na_2CO_3; концентрацию активатора в диапазоне 3—8 мас.%. На 7-е сутки после обработки контейнер вскрывали и извлекали компаунд (рис. 5б). Для определения регламентированных свойств его разрезали на образцы в форме кубиков с размером ребра 20 мм. В целях увеличения объема исследования процесс имитировали путем приготовления образцов цементного компаунда в формах и обработки их в лабораторном автоклаве при тех же технологических параметрах (рис. 6).

а б

Рис. 5. Контейнер (а) для термообработки паром (автоклавирование) цементного компаунда и полученный образец (б)



а б

Рис. 6. Автоклав (а), обработанные образцы цементного компаунда в термостойких силиконовых формах (б)

В экспериментах готовили серии образцов цементных компаундов. При прямом цементировании определяли растекаемость полученного раствора по конусу КР-1 и сроки его схватывания по прибору Вика. На 28-е сутки твердения проводили испытания на механическую прочность (предел прочности при сжатии) цементных компаундов и начинали испытания на морозостойкость, водоустойчивость, водостойкость, радиационную стойкость.

По результатам исследования свойств цементных компаундов определили оптимальные технологические параметры прямого цементирования шлама, позволяющие приготовить цементные компаунды с максимально возможным содержанием шлама, соответствующие регламентированным требованиям, для шлама 1-го и 2-го вида соответственно:

- весовое отношение влажный шлам (с учетом добавочной воды)/вяжущее 1,0—1,1 и 0,9—1,0;
- весовое водовяжущее отношение 0,78—0,80 и 0,80—0,81;
- наполнение цементного компаунда шламом (сух.) 10—15 мас.% и 5—10 мас.%;
- вяжущий материал — портландцемент марки CEM I 52.5 N.

Оптимальные технологические параметры при баротермической обработке цементного компаунда в герметичном контейнере для шлама 1-го и 2-го видов соответственно:

- весовое отношение влажный шлам/вяжущее 2,4—3,8 и 1—1,6;
- весовое водовяжущее отношение 1,0—1,6 и 0,6—0,8;
- наполнение цементного компаунда шламом (сух.) 40—45 мас.% и 25—30 мас.%;
- вяжущий материал — шлак доменный гранулированный молотый;
- активатор — NaOH, в количестве — 5—6% от массы цементного компаунда;
- пластификатор — С-3, в количестве 0,2—0,3% от массы цементного компаунда;
- температура обработки 100—120 °С;
- давление в контейнере 1,1—1,2 атм;
- время обработки 2—3 ч.

Итак, максимальное включение шлама в конечный продукт достигается при реализации процесса цементирования при баротермической обработке в герметичном контейнере и составляет 30—45 мас.% в зависимости от влажности шлама после вакуумной фильтрации. Шлам 2-го вида характеризуется более высокими влажностью и содержанием ИОС по сравнению со шламом 1-го вида, что приводит при увеличении содержания влажного шлама к большему содержанию воды в цементном компаунде. Это обуславливает снижение значения показателей наполнения цементного компаунда шламом 2-го вида для достижения регламентированных показателей как при прямом цементировании, так и при баротермической обработке.

Основные затраты при обращении с РАО определяются объемом конечной формы кондиционированных отходов. Сравнивали объем

зацементированного различными методами шлама с объемом шлама после обезвоживания вакуумной фильтрацией, который был несколько меньше по сравнению с объемом шлама после отстаивания. Был рассчитан коэффициент изменения объема (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициент изменения объема цементного конечного компаунда при различных методах цементирования

Метод цементирования	Параметры цементирования			Коэффициент изменения объема
	Вид шлама	Плотность цементного компаунда, г/см^3	Включение шлама (твердая фаза) в цементный компаунд, масс. %	
Прямое цементирование шлама после отстаивания	1	1,67	15	2,61
		1,74	10	3,75
	2	1,61	10	2,88
		1,71	5	5,42
Прямое цементирование шлама после вакуумной фильтрации	1	1,69	15	2,58
		1,79	10	3,65
	2	1,63	10	2,84
		1,76	5	5,27
Баротермическая обработка	1	1,56	45	0,93
		1,61	40	1,01
	2	1,35	30	1,14
		1,41	25	1,32

Как видно из табл. 4, баротермический метод позволяет уменьшить объем конечного продукта по сравнению с прямым цементированием в среднем в 3—5 раз, с коэффициентом увеличения 1,1—1,3 раза. В некоторых случаях был отмечен эффект снижения с коэффициентом до 0,93, что обусловлено удалением пор из компаунда со шламом при виброуплотнении.

Выполнен анализ соответствия цементных компаундов критериям приемлемости для захоронения [10] со шламами из каждой емкости ОДИЦ ВВЭР и НВАЭС, приготовленных в соответствии с разработанными рецептурами при максимальном наполнении. Установлено, что цементный компаунд со шламом практически из всех емкостей (15 из 16) относится к классу 4 и из одной емкости несколько превышает граничные значения и относится к классу 3. Все указанные цементные компаунды отвечают критериям приемлемости, установленным в НП-093-14.

В настоящее время проводятся работы по созданию технологии цементирования шлама баротермическим методом. Создается экспериментальная установка периодического действия с производительностью до 100 кг за один технологический цикл, с расчетом времени приготовления и обработки цементного компаунда 4—6 часов.

С целью технико-экономического обоснования данного метода, была проведена оценка стоимости кондиционирования шлама и обращения с конечным продуктом в сравнении со способом прямого цементирования. При этом использовались планируемые характеристики баротермической технологии и экспертные оценки на основе известных данных существующих процессов прямого цементирования. В расчетах учитывались: производительность, энергопотребление, объем цементного компаунда, цена и размеры контейнера НЗК-150-1,5П, первичных упаковок для баротермической обработки (4 штуки для размещения в НЗК с 95-процентным заполнением). Стоимость материалов, захоронения РАО [11] и транспортирования 1 м^3 кондиционированных отходов к месту изоляции была принята 5 % от стоимости захоронения. Затраты на оборудование и оплату труда были приняты одинаковыми для обоих методов и не учитывались в расчетах.

Технико-экономическая оценка показала, что баротермическая технология по сравнению с прямым цементированием позволяет снизить стоимость обращения (кондиционирование, транспортирование и захоронение) в 2,7—2,8 раза на 1 м^3 шлама. При этом объем конечного продукта для захоронения снижается в 3—5 раз.

Исследования метода баротермического цементирования шлама, заключающегося в синтезе цементного компаунда в герметичном контейнере в условиях повышенных температуры 100—120 °С и давления 1—1,5 атм (0,1—0,15 МПа), позволяют предположить, что он может быть использован для кондиционирования других сложных РАО (органические жидкости, солевые отходы, плавы, осадки, содержащие бораты и сульфаты, с повышенным содержанием поверхностно-активных веществ, отработанные ионообменные смолы). Целью применения данного метода является увеличение наполнения по отходам конечного продукта в 2—4 раза (в сравнении с прямым цементированием), снижение его объема в 2—4 раза, повышение стойкости цементного компаунда к внутренней и внешней коррозии, химическое связывание радионуклидов и снижение скорости их выщелачивания в 100—1 000 раз.

Баротермическое цементирование позволяет провести в цементном компаунде для некоторых видов отходов полное связывание воды в гидраты, сходные с природными гидроалюмосиликатами. Исключение несвязанной поровой воды приведет к снижению выделения водорода

при ее радиолизе, что позволит рассматривать возможность применения способа цементирования для кондиционирования РАО 2 класса.

Основные принципы метода: приготовление полусухой цементной смеси, использование шлакощелочных вяжущих материалов (молотого металлургического шлака, щелочного активатора), применение технологий прессования (вибрации, прессования, экструзии) для уплотнения цементного компаунда и самоавтоклавирование в герметичной первичной упаковке.

Развитие баротермического метода может сформировать новое научное направление кондиционирования сложных для переработки РАО и, вероятно, создания строительных и защитных конструкций на объектах атомной энергетики. Решение задач создания долговечных бетонов принципиально важно для развития области знаний использования атомной энергии. Результаты проекта могут существенно повлиять на современную науку, изменив представление о закономерностях при обращении с радиоактивными отходами.

Литература

1. НП-019-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности.
2. *Варлаков А. П., Жеребцов А. А., Германов А. В., Маряхин М. А., Варлакова Г. А., Петров В. Г., Калмыков С. Н., Крапивина М. К.* Цементирование радиоактивных отходов методом горячего прессования в контейнере // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 19—29. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-19-29.
3. *Ерошкина Н. А., Коровкин М. О., Тымчук Е. И.* Структурообразование геополимеров // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 123—126.
4. ГОСТ Р 57293-2016. Цемент общестроительный. Технические условия. — М. : Стандартинформ, 2016. 22 с.
5. СТО 99126491-22-2023. Шлак доменный гранулированный молотый. Технические условия. — Челябинск, 2023. 71 с.
6. ГОСТ Р 55064-2012. Натр едкий технический. Технические условия. — М. : Стандартинформ, 2019. 41 с.
7. ГОСТ Р 50418-92. Силикат натрия растворимый. Технические условия. — М. : Издательство стандартов, 1993. 27 с.
8. ГОСТ 83-79. Реактивы. Натрий углекислый. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 2001. 11 с.
9. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. — М. : Стандартинформ, 2010. 11 с.
10. НП-093-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.
11. Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов 1, 2, 3, 4, 5, 6 классов на период с 2023 по 2027 годы : приказ Федеральной антимонопольной службы от 11.10.2022 № 732/22.

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

Корнюшкина Ольга Викторовна, директор по выводу из эксплуатации АЭС — директор Департамента по обращению с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выводу из эксплуатации АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом» (115191, Москва, Холодильный переулок, д. 3А), e-mail: kornushkina-ov@rosenergoatom.ru.

Матвеенко Александр Валентинович, главный технолог управления по обращению с РАО, ОЯТ и ОНАО Департамента по обращению с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выводу из эксплуатации АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом» (115191, Москва, Холодильный пер., д. 3А), e-mail: matveenko-av@rosenergoatom.ru.

Кащенко Артем Андреевич, главный эксперт управления по обращению с РАО, ОЯТ и ОНАО Департамента по обращению с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выводу из эксплуатации АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом» (115191, Москва, Холодильный пер., д. 3А), e-mail: kaschenko-aa@rosenergoatom.ru.

Петров Сергей Сильвестрович, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор отделения общестанционных технологий, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: sspetrov@vniiaes.ru.

Библиографическое описание статьи

Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А., Павлова А. Г., Корнюшкина О. В., Матвеенко А. В., Кащенко А. А., Петров С. С. Цементирование ЖРО в виде шлама при повышенных температуре и давлении — инновационный подход к сокращению объемов кондиционированных отходов АЭС // Радиоактивные отходы. 2026. № 3 (36). С. 8—16. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-8-16.

CEMENTATION OF LRW SLUDGE AT ELEVATED TEMPERATURE AND PRESSURE: AN INNOVATIVE APPROACH REDUCING THE VOLUME OF CONDITIONED NPP WASTE

Varlakov A. P.[1], Germanov A. V.[1], Maryakhin M. A.[1], Pavlova A. G.[1], Kornyushkina O. V.[2], Matveenko A. V.[2], Kashchenko A. A.[2], Petrov S. S.[3]

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

[2] JSC "Concern Rosenergoatom", Moscow, Russia

[3] JSC "All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation", Moscow, Russia

Article received on June 23, 2026

This article focuses on liquid radioactive waste from NPPs in a sludge form and its conditioning. It considers sludge cementation methods based on various binders and cement compound preparation techniques. The paper presents the key parameters of various cementation methods, as well as the corresponding volume change coefficients for the final waste form. The paper summarizes a study of barothermal cementation with a cement compound produced under elevated temperature and pressure. It demonstrates greater treatment efficiency for sludge-type LRW in terms of relevant technical and economic indicators achieved.

Keywords: *radioactive waste, cementation, sludge, hot pressing, barothermal treatment, slag.*

References

1. NP-019-15. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Collection, Processing, Storage and Conditioning of Liquid Radioactive Waste. Safety Requirements].

2. Varlakov A. P., Zherebtsov A. A., Germanov A. V., Mariakhin M. A., Varlakova G. A., Petrov V. G., Kalmykov S. N., Krapivina M. K. Tsementirovaniye radioaktivnykh otkhodov metodom goryachego pressovaniya v konteynere [Radioactive waste cementation via the in-container hot pressing method]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 3 (20), pp. 19—29. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-19-29.

3. Eroshkina N. A., Korovkin M. O., Tymchuk E. I. Strukturoobrazovaniye geopolimerov [Formation of geopolymer structures]. *Molodoy uchenyy — Young scientist,* 2015, no. 7 (87), pp. 123—126.
4. GOST R 57293-2016. *Tsement obshchestroitel'nyy. Tekhnicheskiye usloviya* [Common cement. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 22 p.
5. STO 99126491-22-2023. *Shlak domennyy granulirovannyy molotyy. Tekhnicheskiye usloviya* [Granulated ground blast furnace slag. Specifications]. Chelyabinsk, 2023. 71 p.
6. GOST R 55064-2012. *Natr yedkiy tekhnicheskiy. Tekhnicheskiye usloviya* [Sodium hydroxide for industrial use. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 41 p.
7. GOST R 50418-92. *Silikat natriya rastvorimyy. Tekhnicheskiye usloviya* [Soluble Sodium Silicate. Specifications]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1993. 27 p.
8. GOST 83-79. Reaktivy. *Natriy uglekislyy. Tekhnicheskiye usloviya* [Reagents. Sodium Carbonate. Specifications]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2001. 11 p.
9. GOST 24211-2008. *Dobavki dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [Admixtures for concretes and mortars. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 11 p.
10. NP-093-14. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Kriterii priyemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Radioactive Waste Acceptance Criteria for Disposal].
11. *Ob ustanovlenii tarifov na zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov 1, 2, 3, 4, 5, 6 klassov na period s 2023 po 2027 gody : prikaz Federal'noy antimonopol'noy sluzhby ot 11.10.2022* [On the Establishment of Disposal Tariffs for Radioactive Waste Class 1, 2, 3, 4, 5, 6 Effective from 2023 to 2027: Order of the Federal Antimonopoly Service of October 11, 2022], No. 732/22.

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 1, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: AnGPavlova@bochvar.ru.

Kornyushkina Olga Viktorovna, Director of decommissioning of NPP — Director of the Department for Radioactive Waste Management, Spent Nuclear Fuel and Decommissioning of Nuclear Power Plants, JSC "Concern Rosenergoatom" (3A, Kholodil'ny Lane, Moscow, 115191, Russia), e-mail: kornushkina-ov@rosenergoatom.ru.

Matveenko Alexander Valentinovich, Chief Technologist of the Department for Radioactive Waste Management, Spent Nuclear Fuel and Very Low-level Radioactive Waste of the Department for Radioactive Waste Management, Spent Nuclear Fuel and Decommissioning of Nuclear Power Plants, JSC "Concern Rosenergoatom" (3A, Kholodil'ny Lane, Moscow, 115191, Russia), e-mail: matveenko-av@rosenergoatom.ru.

Kashchenko Artem Alexandrovich, Chief Expert of the Department for Radioactive Waste Management, Spent Nuclear Fuel and Very Low-level Waste of the Department for Radioactive Waste Management, Spent Nuclear Fuel and Decommissioning of Nuclear Power Plants, JSC "Concern Rosenergoatom" (3A, Kholodil'ny Lane, Moscow, 115191, Russia), e-mail: kaschenko-aa@rosenergoatom.ru.

Petrov Sergey Silvestrovich, Deputy Director of VNIIAES-NTP, Director of the Department of General Station Technologies, JSC "All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation" (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: sspetrov@vniiaes.ru.

Bibliographic description

Varlakov A. P., Germanov A. V., Maryakhin M. A., Pavlova A. G., Kornyushkina O. V., Matveenko A. V., Kashchenko A. A., Petrov S. S. Cementation of LRW Sludge at Elevated Temperature and Pressure: an Innovative Approach Reducing the Volume of Conditioned NPP Waste. *Radioactive Waste,* 2026, no. 3 (36), pp. 8—16. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-8-16. (In Russian).