DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-63-72 УДК: 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТАМПОНАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ СКВАЖИН ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ «ЖЕЛЕЗНОГОРСКИЙ»

А. В. Понизов[1], А. П. Пустовгар[2], А. Н. Дорофеев[3], П. М. Верещагин[1], И. П. Соколов[1]

[1]ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

[2]Научно-исследовательский институт строительных материалов и технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва

[3]Госкорпорация «Росатом», Москва

Статья поступила в редакцию 05 июня 2021 г.

В статье приводятся результаты исследований тампонажных материалов на основе портландцемента и цементно-бентонитовых смесей с целью оценки влияния факторов, воздействующих на показатели их защитных свойств, применительно к условиям в пункте глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Железногорский». В качестве основных факторов для различных тампонажных материалов рассмотрены: химический состав воздействующих водных сред эксплуатационных горизонтов; температура водных сред, содержащих тепловыделяющие радионуклиды. При проведении исследования определялось влияние данных факторов на следующие защитные свойства пампонажных материалов после твердения: прочность, водонепроницаемость, склонность к образованию дефектов. Полученные результаты исследования могут быть использованы при планировании закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, тампонажные материалы, портландцемент, бентонитовая глина, подземные воды, физико-механические характеристики, скважины.*

Введение

Поэтапная ликвидация подземных сооружений (эксплуатационных скважин) [1] является одной из важнейших задач по закрытию существующих в РФ пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО).

Согласно предпочтительной стратегии МАГАТЭ обеспечение безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО) состоит в локализации (удержании) компонентов РАО в геологической среде посредством использования пассивных инженерно-технических и естественных барьеров безопасности и изоляции от доступной биосферы в течение длительного времени [2]. Наибольшую опасность для обеспечения изоляции захороненных ЖРО от доступной биосферы представляют возможные заколонные перетоки жидкости, содержащей радионуклиды, из глубинных горизонтов вверх по стволам эксплуатационных скважин [3, 4].

Для предотвращения заколонных перетоков компонентов ЖРО конструктивные и технологические решения по ликвидации скважин должны предусматривать применение эффективных инженерных барьеров безопасности, одним из элементов которых является цементный камень, образованный из тампонажных материалов. Выбор и применение тампонажных материалов определяется с учетом их способности образовывать непроницаемые композиции внутри и снаружи скважин, сохраняющие свои изоляционные свойства в условиях существующей геологической среды в течение длительных периодов времени, пока компоненты ЖРО будут представлять опасность для людей и окружающей среды с учетом возможной миграции данных компонентов по стволу и околоствольному пространству скважин, заполненным тампонажным материалом.

Тампонажные материалы должны быть технологичными, обладать реологическими свойствами, обеспечивающими перекачиваемость насосом по трубам на заданную глубину, обладать низким водоотделением, и при этом после закачивания в скважину они должны загустевать, проникать в поры и трещины, набирать прочность и быть устойчивыми к агрессивному внешнему воздействию геологической среды.

В настоящее время в качестве материалов, способных обеспечить изолирование РАО, как правило, рассматривают тампонажный портландцемент, бентонит и цементно-бентонитовые смеси [5, 6]. Из них наибольший интерес для тампонирования ликвидируемых эксплуатационных скважин ПГЗ ЖРО представляют некоторые марки тампонажного портландцемента и его смеси с бентонитом.

На эволюцию тампонажного камня в геологической среде оказывает влияние большое количество факторов. Природные факторы, связанные с условиями размещения ПГЗ ЖРО, такие как наличие в пластовой воде микроорганизмов, агрессивных химических соединений и газов, а также изменение тектонических, геологических, гидрогеологических и климатических условий района размещения ПГЗ ЖРО. Технологические факторы, такие как состав тампонажного материала и технологии приготовления тампонажного раствора и создания инженерного барьера безопасности (режимы закачки, выдержки и т. п.). С учетом вышеизложенного, целью проведенного исследования являлась проработка подходов и методик оценки влияния отдельных факторов, воздействующих на показатели защитных свойств тампонажных материалов, применительно к условиям захоронения ЖРО на ПГЗ ЖРО «Железногорский». В качестве варьируемых факторов в настоящей статье рассматривали: тип тампонажного материала; химический состав воздействующих водных сред эксплуатационных горизонтов; температуру водных сред, содержащих тепловыделяющие радионуклиды. При проведении исследования оценивали влияние данных факторов на характеристики, определяющие защитные свойства создаваемых инженерных барьеров безопасности при ликвидации эксплуатационных скважин (тампонажных камней): прочность, водонепроницаемость, склонность к образованию дефектов.

Исходные материалы и методы исследования

В качестве исходного материала для проведения исследования использовали тампонажный портландцемент бездобавочный для низких и нормальных температур ПЦТ I-G-50, соответствующий ГОСТ 1581-96 [7]. Для регулирования реологических, изоляционных свойств и водоотделения в качестве добавки к ПЦТ I-G-50 использовали глинопорошок бентонитовый типа БМ-У, широко применяемый в нефтегазовой промышленности для приготовления и регулирования свойств водных глинистых растворов, используемых при бурении нефтяных и газовых скважин [8], тоннельной проходки, а также для строительства сооружений по технологии «стена в грунте», устройства противофильтрационных завес, тиксотропных рубашек и др.

При проведении исследования изготовляли смеси в соотношении 90% ПЦТ I G-50 и 10% БМ-У.

В качестве исследуемых водных сред использовали:

- подземную воду эксплуатационных горизонтов в районе размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- модельный раствор, иммитирующий химический состав ЖРО, захораниваемых на ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Подземная вода имела pH = 6 и содержала следующие ионы (в мг/дм^3): Fe (общ.) — 4,11; Na^+ — 57,75; Ca^{2+} — 36,34; Mg^{2+} — 10,02; NO_3^- — 0,5; SO_4^{2-} — 3,12; Cl^- — 11,11; F^- — 0,12; HCO_3^- — 293,05.

Модельный раствор содержал (г/дм^3): NaOH — 0,018; $NaNO_3$ — 350; Al^{3+} — 3,4; Cl^- — 0,5, а также взвешенные вещества в количестве 30 мг/дм^3.

Исследования проводили путем непосредственного воздействия водных сред на твердеющие образцы тампонажных материалов. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

Образцы выдерживали в емкостях из коррозионностойкого материала (каждая объемом не менее 6,2 л) с водной средой в климатической

Рис. 1. Вид образцов тампонажных материалов, подготовленных для испытаний

камере при температурах 20 и 60 °С. Режим химического воздействия водных сред на образцы — статический. Слой модельного раствора поддерживали над образцами не менее 1 см.

Модельные растворы для исследования готовились в объеме, не менее чем в 2 раза превышающем объем каждой емкости, и хранились в закрытой таре при соблюдении условий хранения химических растворов.

В рамках проведения экспериментальных работ исследовались следующие характеристики тампонажных материалов с применением стандартизированных методик:

- измерение массы и плотности приготовленных образцов тампонажных материалов по ГОСТ 310.4-81 [9];
- определение предела прочности на растяжение при изгибе и предела прочности на сжатие по ГОСТ 310.4-81 [9];
- изолирующей способности по ГОСТ 12730.5-84 [10].

Коэффициенты фильтрации тампонажного камня определяли с помощью установки УВБ-МГ4.01 в соответствии с методикой, приведенной в ВСН 132-92 «Правила производства и приемки работ по нагнетанию растворов за тоннельную обделку» [11].

Фазовый состав цементного камня определяли на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL X'tra с учетом методических рекомендаций, представленных в ASTM 1365-06 [12].

Определение макро- и микродефектов в структуре цементного камня проводили методом рентгеновской микротомографии с использованием комплексной системы SkyScan с учетом методических рекомендаций, представленных в ASTM 1672-12 [13].

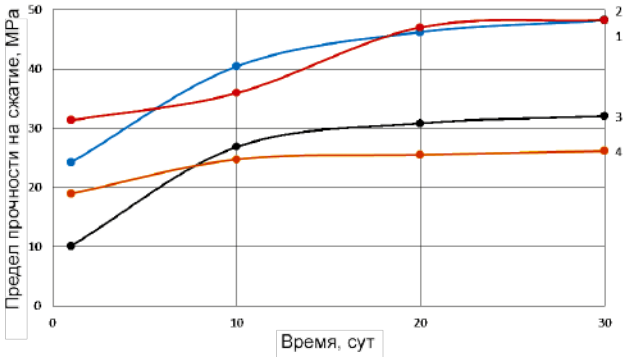
Определение степени коррозии поверхностного слоя цементного камня осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200, оснащенного рентгеновским спектрометром для проведения элементного микроанализа (EDAX).

Исследование характеристик тампонажных материалов проводилось на начальном этапе формирования тампонажного камня и до возраста 30 суток в условиях воздействия на них природной водной и модельной сред.

Результаты определения физико-механических характеристик тампонажных материалов

Согласно полученным данным по определению предела прочности тампонажного материала на сжатие, представленным на рис. 2, было установлено:

- с увеличением времени выдержки в модельном растворе значения предела прочности образцов тампонажных материалов на сжатие возрастали до возраста 20 суток и практически стабилизировались на временном отрезке 20—30 суток;
- добавка 10 % бентонита к тампонажному портландцементу приводит к снижению предела прочности при сжатии, по сравнению с тампонажным портландцементом, на всем временном периоде выдержки в модельном растворе до возраста 30 суток;
- увеличение температуры (с 20 до 60 °С) приводит к росту предела прочности на сжатие



1 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 20 °С;
2 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 60 °С;
3 — цементно–бентонитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 20 °С; 4 — цементно–бентонитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 60 °С

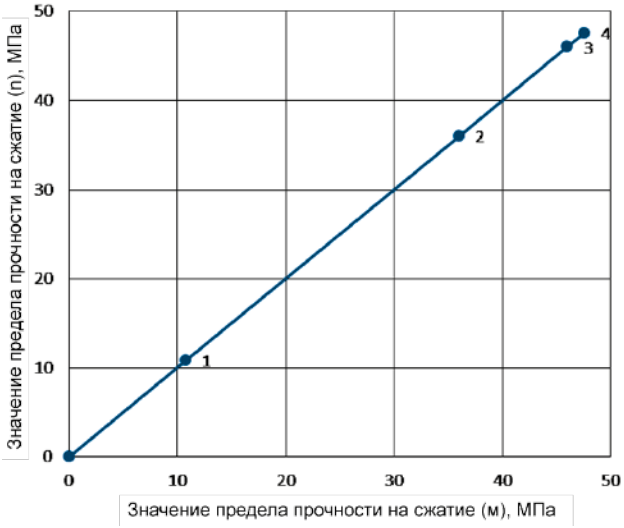
Рис. 2. Зависимости изменения предела прочности на сжатие от времени для образцов тампонажных материалов, контактирующих с модельным раствором

образцов тампонажных материалов в начальный период набора прочности при выдержке в модельном растворе;

- для образцов тампонажного портландцемента, твердеющего в модельном растворе при температуре 60 °С, наблюдается замедление набора прочности к возрасту 5 суток и постепенное увеличение скорости набора прочности к возрасту 20 суток с последующей стабилизации значений предела прочности при сжатии до показателей (46—47 МПа), аналогичных значениям, достигаемым образцами тампонажного портландцемента в возрасте 30 суток, твердеющего при температуре 20 °С;
- для образцов тампонажного портландцемента с добавлением 10 % бентонита набор прочности в модельном растворе при температуре 60 °С стабилизировался в возрасте 10 суток, достигнув значения 26 МПа, которое сохранилось и в 30 суток. Снижение предела прочности образцов, твердевших при температуре 60 °С, по сравнению с образцами, твердевших при температуре 20 °С, составило 18—20 %.

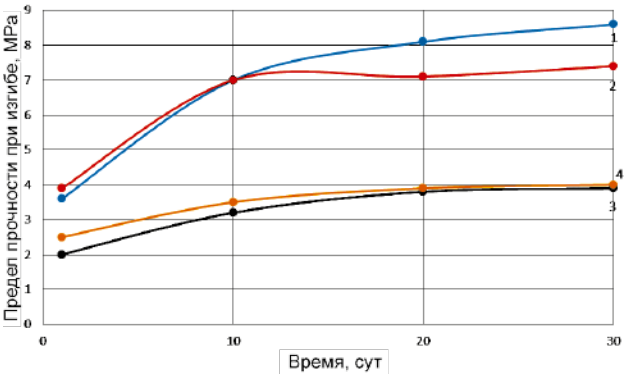
Результаты проведенных экспериментов показали, что замена подземной воды на модельный раствор не оказывает значительного влияния на прочность на сжатие тампонажного портландцемента в возрасте 30 суток. Как видно из рис. 3, в обоих случаях экспериментальные данные располагаются на одной прямой постоянного состава во всем исследуемом интервале времени воздействия данных водных сред на тампонажный портландцемент.

Результаты исследования влияния среды и температуры выдержки на прочность растяжения



Время выдержки, сутки: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30

Рис. 3. Корреляция между значениями предела прочности на сжатие от времени для образца, изготовленного из тампонажного портландцемента при 20 °С при выдержке в подземной воде (п) и модельном растворе (м)



1 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 20 °С;
2 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 60 °С;
3 — цементно–бентонитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 20 °С ; 4 — цементно–бентонитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 60 °С

Рис. 4. Зависимость изменения значений предела прочности на изгиб от времени для тампонажных материалов, контактирующих с модельным раствором

при изгибе тампонажных материалов представлены на рис. 4. Было установлено, что:

- с увеличением времени выдержки в модельном растворе прочность образцов тампонажных материалов на растяжение при изгибе возрастает до возраста 20 суток и практически стабилизируются на временном отрезке 20—30 суток;
- добавка 10 % бентонита к тампонажному портландцементу приводит к снижению прочности на растяжение при изгибе, по сравнению с тампонажным портландцементом, на всем временном периоде выдержки в модельном растворе до возраста 30 суток;

- увеличение температуры (с 20 до 60 °С) практически не оказывает значительного влияния на прочность растяжения при изгибе образца тампонажного портландцемента с добавлением 10 % бентонита в течении всего периода набора прочности до возраста 30 суток при выдержке в модельном растворе;
- для образцов тампонажного портландцемента, твердеющего в модельном растворе при температуре 60 °С, наблюдается снижение прочности на растяжение при изгибе в возрасте 10 суток на 17—20 % по сравнению с температурой выдержки 20 °С.

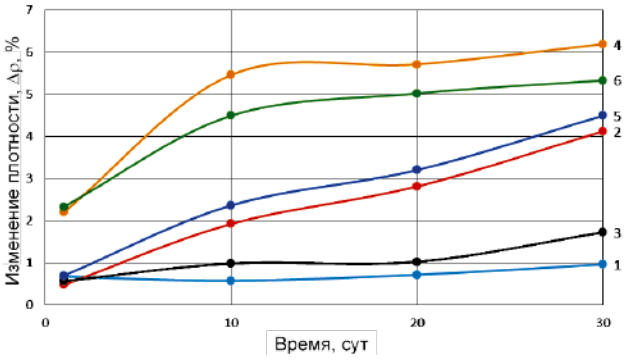
Выдержка в подземной воде практически не оказывала влияния на прочность растяжения при изгибе образцов тампонажных материалов.

Результаты изменения плотности образцов тампонажных материалов приведены на рис. 5.

Незначительное увеличение плотности наблюдалось у образцов тампонажного портландцемента в течение всего срока выдержки в водных средах при температуре 20 °С, при этом максимальное увеличение плотности к 30 суткам составило 6 % от первоначальной.

У образцов тампонажных портландцементов с добавкой 10 % бентонита увеличение плотности наблюдалось до возраста 10 суток с последующей стабилизацией. При температуре выдержки 60 °С увеличение плотности наблюдалось для всех образцов тампонажных материалов в течение всего срока выдержки в модельном растворе.

Результаты измерения изолирующей способности исследуемых тампонажных материалов

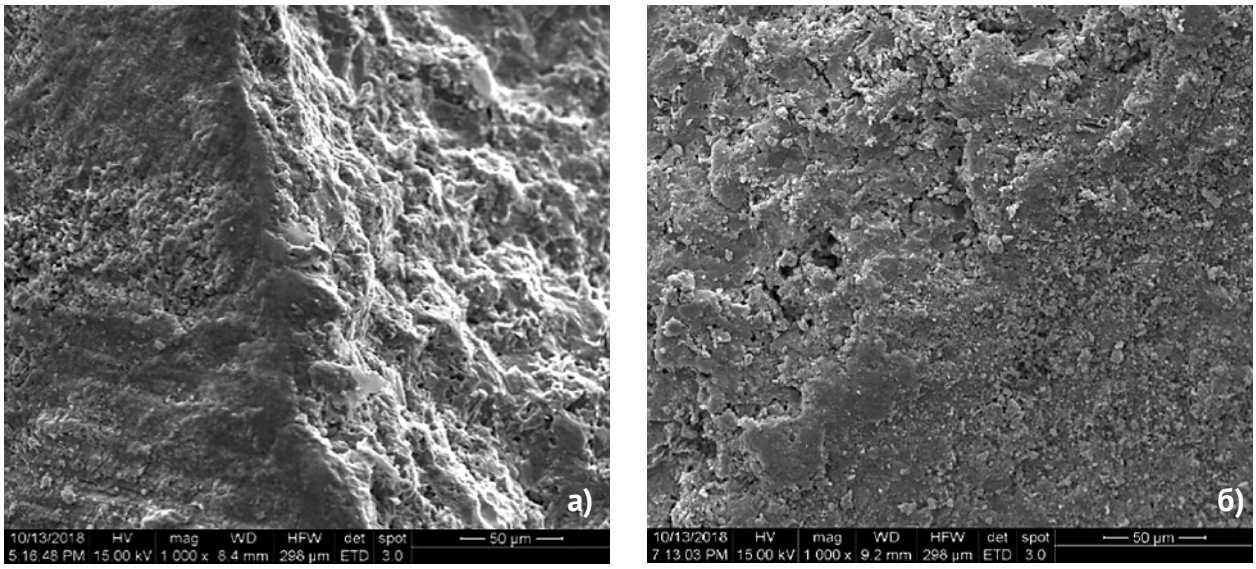


1 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 20 °С в контакте с модельным раствором; 2 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 60 °С в контакте с модельным раствором; 3 — портландцемент тампонажный, температура выдержки 20 °С в контакте с подземной водой; 4 — цементно–бенотнитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 20 °С в контакте с модельным раствором; 5 — цементно–бенотнитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 60 °С в контакте с модельным раствором; 6 — цементно–бенотнитовая смесь в соотношении 90:10 (%), температура выдержки 20 °С в контакте с подземной водой

Рис. 5. Изменение плотности образцов тампонажных материалов от времени выдержки в водных средах

показали, что для всех варьируемых условий марка по водонепроницаемости за редким исключением (соответствующим отнесению к марке W18) относится к наивысшей по показателю водонепроницаемости марке W20, что соответствует значениям параметра воздухонепроницаемости 0,0112—0,0077 см³/с и сопротивлению проникновения воздуха 88,6—130,2 с/см³.

По результатам исследований с использованием растровой электронной микроскопии (рис. 6) видимых микро- и макродефектов у всех исследуемых образцов обнаружено не было, что



Граница поверхность/глубина (увеличение в 1 000 раз)

Рис. 6. Микрофотографии образца ПЦТ I-G-50 на 30 сутки выдержки в модельном растворе (а) и подземной воде (б) при 20 °С

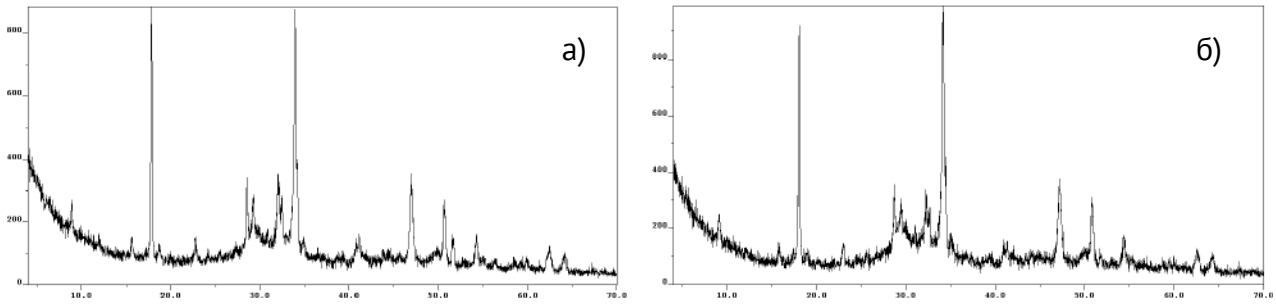


Рис. 7. Зарегистрированные дифрактограммы слоя материала образца ПЦТ-I-G-50 на глубине 2 мм при выдержке 10 (а) и 30 (б) суток

указывает на отсутствие влияния на структуру тампонажного камня после 30 суток выдержки в подземной воде и модельном растворе.

Микроструктура исследованных образцов тампонажного камня плотная, без видимых изменений, очаги и признаки коррозионного разрушения отсутствуют.

По результатам исследований были определенны значения коэффициентов фильтрации $K_ф$, при различных температурах и для различных тампонажных материалов:

- при температуре 20 °С после выдержки в обеих водных средах $K_ф = 5{,}7 \cdot 10^{-12}$ см/с для тампонажного портландцемента и $K_ф = 5{,}1 \cdot 10^{-12}$ см/с для тампонажного портландцемента с добавкой 10% бентонита;
- при температуре 60 °С для обоих тампонажных материалов $K_ф = 5{,}5 \cdot 10^{-12}$ см/с после выдержки в подземной воде и $K_ф = 5{,}1 \cdot 10^{-12}$ см/с после выдержки в модельном растворе.

Результаты исследования эволюции фазового состава тампонажных материалов

В процессе твердения тампонажных материалов в водных средах, в результате протекающих реакций гидратации, происходит изменение их фазового состава и формирование микроструктуры тампонажного камня. На данном этапе формируются основные физико-механические свойства тампонажного камня.

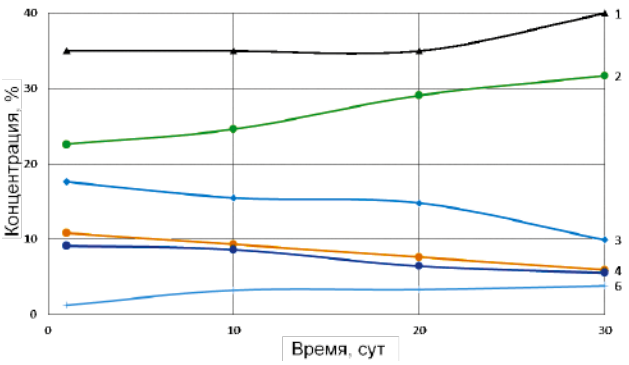
Фазовый состав исследуемых образцов определялся методом рентгеновской порошковой дифрактометрии. При проведении рентгенофазового анализа производили раздельный отбор покровного слоя образца, образовавшегося в результате взаимодействия водной среды и тампонажного камня, а также части образца тампонажного камня, не подвергшегося прямому воздействию раствора среды выдерживания. Рентгенофазовый анализ образцов выполняли через контролируемые временные периоды: 1, 10, 20 и 30 суток выдержки в водной среде. Примеры дифрактограмм, зарегистрированных в ходе исследования, приведены на рис. 7.

Согласно результатам проведенного рентгенофазового анализа, на глубине 2 мм от поверхности образца в течение 1—30 суток выдержки в водных средах происходили количественные изменения фазового состава тампонажного камня.

Типичный характер изменения содержания основных фаз связан с увеличением в составах тампонажного камня аморфной составляющей и портландита и сокращением количества клинкерных фаз по мере увеличения степени гидратации образцов. Следует отметить постепенное монотонное увеличение количества карбоната кальция в составах образцов, что связано с протеканием реакций карбонизации. На рис. 8 показана динамика изменения фазового состава тампонажного камня на протяжении 30 суток выдержки в подземной воде при температуре 20 °С.

При твердении тампонажного портландцемента по мере формирования структуры происходит:

- уменьшение содержания непрореагировавших фаз цементного клинкера: алита ($3CaO \cdot SiO_2$),



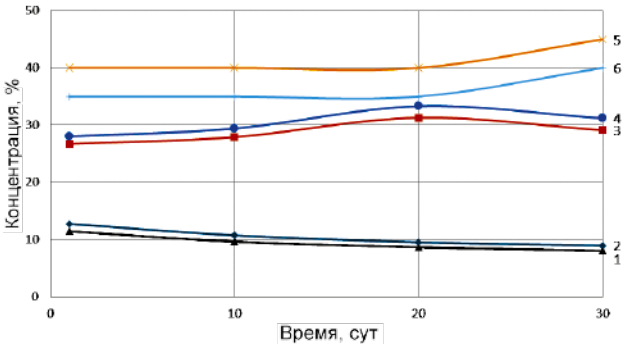
1 — аморфная фаза; 2 — портландит; 3 — алит; 4 — белит; 5 — четырехкальциевый алюмоферрит; 6 — кальцит

Рис. 8. Эволюция фаз (на глубине 2 мм) при контактировании образца, изготовленного из тампонажного портландцемента, с подземной водой при температуре выдержки 20 °С

белита ($2CaO{\cdot}SiO_2$), четырехкальциевого алюмоферрита ($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$);
- увеличение содержания аморфной фазы (-C-S-H геля), портландита [$Ca(OH)_2$] и кальцита ($CaCO_3$).

В качестве продуктов гидратации образцов исследованных тампонажных материалов, твердевших при 20 °С, обнаружен эттрингит, а для образцов, твердевших при 60 °С, отмечено наличие гидрогранта (катоита).

На рис. 9 приведен сравнительный анализ эволюции фаз для образцов исследуемых тампонажных материалов, выдерживаемых в течении 30 суток в модельном растворе.



1 — алит в образце цементно–бентонитовой смеси (90 %:10 %); 2 — алит в образце портландцемента тампонажного; 3 — портландит в образце цементно–бентонитовой смеси (90 %:10 %); 4 — портландит в образце портландцемента тампонажного; 5 — аморфная фаза в образце цементно–бентонитовой смеси (90 %:10 %); 6 — аморфная фаза в образце портландцемента тампонажного

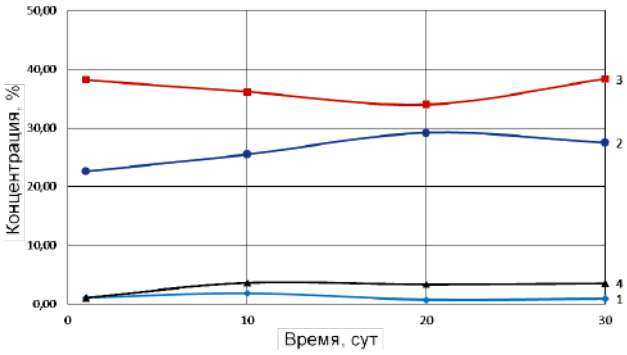
Рис. 9. Эволюция фаз тампонажных материалов на глубине 2 мм при выдержке в модельном растворе при 60 °С

Результаты анализа количественного фазового состава показывают:
- идентичность динамики изменения содержания алита, портландита и аморфной составляющей в составах тампонажных материалов по мере твердения и набора прочности;
- снижение содержания портландита после 20 суток твердения тампонажных материалов, вероятно, обусловлено началом процессов карбонизации.

В составе налета на поверхности исследуемых образцов тампонажного камня было обнаружено существенное содержание карбоната кальция, что связано с карбонизацией портландита, образующегося в процессе гидратации цементных фаз по следующей реакции:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

В составе налета на поверхности тампонажного камня было отмечено также наличие содалита ($3Na_2O{\cdot}3Al_2O_3{\cdot}6SiO_2{\cdot}2NaCl$) и вишневита ($Na_8(AlSiO_4)_6O_{24}(SO_4){\cdot}2H_2O$).



1 — портландит на поверхности образца; 2 — портландит на глубине 2 мм в образце; 3 — кальцит на поверхности образца; 4 — кальцит на глубине 2 мм в образце

Рис. 10. Эволюция фаз в образце тампонажного портландцемента при выдержке в модельном растворе при 20 °С

На рис. 10 представлено изменение содержания портландита на поверхности тампонажного камня по сравнению с его содержанием на расстоянии 2 мм от поверхности и соответствующее этому увеличение содержания кальцита на поверхности по сравнению с его содержанием в глубине тампонажного материала.

Следует отметить, что для образцов тампонажных материалов после увеличения содержания карбоната кальция в начальные сроки выдержки в водных средах наблюдается стабилизация его содержания для образцов, выдерживаемых при температуре 20 °С, к 30 суткам выдержки, а для образцов, выдерживаемых при 60 °С, — к 20 суткам выдержки, что указывает на уплотнение структуры образцов за счет кольматации пор продуктами карбонизации портландита и прекращения выноса портландита на поверхность образцов тампонажных материалов.

Заключение

Рассмотренные подходы и методики по оценке изменения физико-механических свойств тампонажного портландцемента и его смеси с 10 % бентонита в результате воздействия на них водных сред, характеризующих химический состав как подземных вод эксплуатационных горизонтов, так и захораниваемых отходов ПГЗ ЖРО «Железногорский», позволили:
- установить зависимости пределов прочности этих материалов на сжатие, растяжение при изгибе и их плотности от времени контакта с водными средами при варьировании значений температуры водных сред;
- определить для исследованных систем значения показателей, характеризующих защитные

свойства тампонажных материалов: водонепроницаемости, коэффициента фильтрации.

Полученные данные о воздействии водных сред на изменение защитных свойств тампонажных материалов относятся к этапу начала твердения и набора прочности, при этом отмечена стабилизация значений физико-механических характеристик и защитных свойств по достижении 30 суток выдержки в модельных водных средах.

Анализ эволюции фаз в портландцементе и его смеси с 10% бентонита в результате контакта с водными средами позволил отметить важную роль портландита в изменении состава тампонажных материалов в зависимости от варьируемых условий существования реакционной системы тампонажный материал — водная среда.

Полученные результаты исследования тампонажных материалов могут быть использованы при работах, выполняемых в рамках планирования закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Литература

1. *Понизов А. В.* Система организационно-технических мер по обеспечению безопасного закрытия пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Концептуальные положения // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. № 4 (98). С. 47—60. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.005.
2. Международное агентство по атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования по безопасности. № SSR-5. МАГАТЭ. Вена. 2011.
3. *Понизов А. В., Верещагин П. М., Чулков Н. В., Шарапута М. К., Байдарико Е. А.* Условия, последствия и пути предотвращения заколонных перетоков жидкостей по стволам скважин на участках глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 2. С. 56—57. DOI: 10.31857/S0869-78092019256-67.
4. *Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др.* Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 54—63.
5. *Варлаков А. П., Жеребцов А. А., Петров В. Г. и др.* Оценка радиационных и температурных нагрузок на цементный компаунд, содержащий имитаторы радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2020. № 1. С. 66—72. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-66-72.
6. *Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А. и др.* Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1. С. 35—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
7. ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия.
8. *Пустовгар А. П., Абрамова А. Ю., Ерёмина Н. Е., Ганиев С. Р.* Исследование возможности частичного замещения портландцемента кварцевой мукой Silverbond в составе тампонажных материалов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 8. С. 27—36. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-8-27-36.
9. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии.
10. ГОСТ 12730.5-84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
11. ВСН 132-92. Ведомственные строительные нормы. Правила производства и приемки работ по нагнетанию растворов за тоннельную обделку.
12. ASTM 1365-06 (2011). Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis.
13. ASTM l672-12. Standard Guide for Computed Tomography (CT) System Selection.

Информация об авторах

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Пустовгар Андрей Петрович, кандидат технических наук, научный руководитель, Научно-исследовательский институт строительных материалов и технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26), e-mail: PustovgarAP@mgsu.ru.

Дорофеев Александр Николаевич, кандидат технических наук, руководитель проектного офиса «Формирование единой государственной системы обращения с РАО», Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Верещагин Павел Михайлович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: vereschagin@secnrs.ru.

Соколов Иван Павлович, доктор химических наук, главный научный сотрудник, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

Библиографическое описание статьи

Понизов А. В., Пустовгар А. П., Дорофеев А. Н., Верещагин П. М., Соколов И. П. Исследование характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Железногорский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 63—72. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-63-72.

EXLORING THE CHARACTERISTICS OF BACKFILL MATERIALS PROPOSED FOR WELL DECOMMISSIONING PURPOSES AT THE SITE OF ZHELEZNOHORSK LIQUID RADIOACTIVE WASTE DEEP DISPOSAL FACILITY

Ponizov A. V.[1], Pustovgar A. P.[2], Dorofeev A. N.[3], Vereshchagin P. M.[1], Sokolov I. P.[1]

[1]Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

[2]Research Institute of Building Materials and Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

[3]State Corporation Rosatom, Moscow, Russia

Article received on June 05, 2021

The paper focuses on Portland cement and cement-bentonite mixture-based backfill materials presenting the results of studies performed to assess the influence of factors affecting their performance and protective properties considering the conditions inherent for the Zheleznogorsk liquid radioactive waste deep disposal facility. The following factors were considered as the key ones: type of the backfill material; chemical composition of the impacting aquatic environments in the injection horizons; temperature of aqueous media containing heat-generating radionuclides. During the study, specified was the influence of these factors on the following protective properties of the formed backfill stones: strength, water resistance, tendency to defect formation. The results obtained can be used to develop closure designs for the Zheleznogorsk LRW DDF.

Keywords: *radioactive waste, deep disposal facility for liquid radioactive waste, backfill materials, Portland cement, bentonite clay, groundwater, physical and mechanical characteristics, wells.*

References

1. Ponizov A. V. Sistema organizatsionno-tekhnicheskikh mer po obespecheniyu bezopasnogo zakrytiya punktov glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Kontseptual'nyye polozheniya [System of Organizational and Technical Measures Providing Safe Closure of Deep Disposal Facilities for Liquid Radioactive Waste. Conceptual Provisions]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety,* 2020, no. 4, pp. 47—60. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.005.

2. International Atomic Energy Agency. *Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements*. No. SSR-5. IAEA. Vienna. 2011.

3. Ponizov A. V., Vereshchagin P. M., Chulkov N. V., Sharaputa M. K., Baidariko E. A. Usloviya, posledstviya i puti predotvrashcheniya zakolonnykh peretokov zhidkostey po stvolam skvazhin na uchastkakh glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [Conditions, Consequences and Ways to Prevent Behind-the-Casing Fluid Flows Through Wellbores at the Sites of Deep Liquid Radioactive Waste Disposal Facilities]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya — Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology,* 2019, no. 2, pp. 56—57. DOI: 10.31857/S0869-78092019256-67.

4. Dorofeev A. N., Saveleva E. A., Utkin S. S., Ponizov A. V. et al. Evolyutsiya obosnovaniya

dolgovremennoy bezopasnosti PGZ ZHRO [Evolution in the Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repositories]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 54—63.

5. Varlakov A. P., Zherebtsov A. A., Petrov V. G., Kapustin V. V., Varlakova G. A., Vlasova I. E., Haritonov I. D., Kalmykov S. N. Otsenka radiatsionnykh i temperaturnykh nagruzok na tsementnyy kompaund, soderzhashchiy imitatory radioaktivnykh" otkhodov [Assessment of Radiation and Temperature Loads on Cement Compound Containing Simulated]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 66—72. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-66-72.

6. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izolyatsionnyye svoystva bentonitovykh bar'yernykh sistem dlya zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v nizhnekanskom massive [Buffer Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in the Geological Repository of the Nizhnekanskiy Massif]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 35—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

7. GOST 1581-96. *Portlandtsementy tamponazhnyye. Tekhnicheskiye usloviya* [Backfill Portland cements. Standard Specifications].

8. Pustovgar A. P., Abramova A. Yu., Eremina N. Ye., Ganiev S. R. Issledovaniye vozmozhnosti chastichnogo zameshcheniya portlandtsementa kvartsevoy mukoy Silverbond v sostave tamponazhnykh materialov [Study of Possible Partial Replacement of Portland Cement with Silverbond Quartz Flour in the Composition of Backfill Materials]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea,* 2019, no. 8, pp. 27—36. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-8-27-36.

9. GOST 310.4-81. *Tsementy. Metody opredeleniya predela prochnosti pri izgibe i szhatii* [Cements. Methods Used to Determine its Ultimate Cross-bending and Compression Strength].

10. GOST 12730.5-84. *Betony. Metody opredeleniya vodonepronitsayemosti* [Concrete. Methods Used to Determine its Water Tightness].

11. VSN 132-92. *Vedomstvennyye stroitel'nyye normy. Pravila proizvodstva i priyemki rabot po nagnetaniyu rastvorov za tonnel'nuyu obdelku* [Institutional Building Codes. Rules for the Execution and Acceptance of Work Associated with Solution Injection Behind the Tunnel Casing].

12. ASTM 1365-06 (2011). *Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis.*

13. ASTM l672-12. *Standard Guide for Computed Tomography (CT) System Selection.*

Information about the authors

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Office, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140, Russia), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Pustovgar Andrey Petrovich, Ph.D., Scientific Supervisor, Research Institute of Building Materials and Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia), e-mail: PustovgarAP @ mgsu.ru.

Dorofeev Aleksander Nikolaevich, Ph.D., Head of the Project Office on the Development of a Unified Radioactive Waste Management System, State Corporation Rosatom (24, Bolshaya Ordynka St., Moscow, 119017, Russia), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Vereshchagin Pavel Mikhailovich, Ph.D., Deputy Head of Department, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140, Russia), e-mail: vereschagin@secnrs.ru.

Sokolov Ivan Pavlovich, Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140, Russia), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

Bibiliographic description

Ponizov A. V., Pustovgar A. P., Dorofeev A. N., Vereshchagin P. M., Sokolov I. P. Exloring the Characteristics of Backfill Materials Proposed for Well Decommissioning Purposes at the Site of Zheleznohorsk Liquid Radioactive Waste Deep Disposal Facility. *Radioactive Waste,* 2021, no. 2 (15), pp. 63—72. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-72. (In Russian).