

8. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., Любашевский Н.М. Особенности радиационной обстановки на Урале. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 151 с.
9. Рихванов Л.П., Нарзулаев С.Б., Язиков Е.Г. и др. Геохимия почв и здоровье детей Томска. – Томск: Изд-во ТПУ, 1993. – 142 с.
10. Коробова Н.Л. Экология почв. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского ГТУ, 2000. – 168 с.
11. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
12. Титаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных рядов распада. – М.: ГЕОС, 2005. – 226 с.
13. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
14. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
15. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Экология, 1997. – Кн. 6: Редкие f-элементы. – 607 с.
16. Глазовская М.А. Касимов Н.С. Теплицкая Т.А. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. – М.: Наука, 1989. – 264 с.
17. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
18. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. – Томск: STT, 2009. – 430 с.
19. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
20. Агурова В.П. Плутоний в почвах Красноярского края: дис. ... канд. биол. наук. – Красноярск, 2001. – 145 с.
21. Michel H., Gasparro J., Barci-Funel G., Dalmaso J., Ardisson G., Sharovarov G. Radioanalytical determination of actinides and fission products in Belarus soils // Talanta – 1999. – V. 48. – P. 821–825.
22. Mietelski J.W., Bogdan W. Plutonium from Chernobyl in Poland // Appl. Radiat. Isot. – 1995. – V. 46. – № 11. – P. 1203–1211.

Поступила 11.04.2011 г.

УДК 621.039.7

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКО- и СРЕДНЕРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПАУНДОВ ОТ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ

О.А. Горбунова, С.Е. Винокуров

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
E-mail: olg-gorbunova@yandex.ru

Впервые установлено, что применение биоцидного полимера класса полигексаметиленгуанидинов в технологиях цементирования жидких и твердых радиоактивных отходов низкой и средней активности позволяет не только предотвратить микробиологическую деструкцию цементных компаундов при длительном хранении в приповерхностных хранилищах, но и улучшить ряд важных технологических параметров процесса цементирования, повысить прочностные свойства конечного продукта, увеличить степень наполнения по отходам конечных компаундов и расширить ассортимент радиоактивных отходов, принимаемых на цементирование.

Ключевые слова:

Радиоактивные отходы, цементирование, микробиологическая деструкция, биоцидные добавки, полигексаметиленгуанидин, суспензирование, пропитка, цементный компаунд, микроструктура, прочность на сжатие.

Key words:

Radioactive waste, cementation process, microbial corrosion, biocide additive, polyhexamethyleneguanidine, slurryfication, impregnation, cement compound, microstructure, compression strength.

Наиболее распространенным способом кондиционирования радиоактивных отходов (РАО) низкой и средней активности (НАО и САО) является цементирование, позволяющее получать с небольшими капитальными и эксплуатационными затратами неогорючий конечный продукт, удовлетворяющий нормативным требованиям ГОСТ Р 51883-2002 [1]. В настоящее время контроль качества цементированных НАО и САО не учитывает микробиологическую деструкцию цементной матрицы. Однако потенциальные субстраты для развития микробиоты в составе отходов при долговременном хранении в условиях хранилищ делают возможным биогенное нарушение микроструктуры цементной матрицы (появление микропор, трещин, полостей). Это ухудшает

иммобилизационные свойства цементной матрицы (прочность на сжатие, морозостойкость, стойкость фиксации радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr) и снижает безопасность долговременного хранения.

Целью работы является повышение надежности и безопасности долговременного хранения кондиционированных НАО и САО за счет разработки и внедрения научно обоснованных технических решений по защите цементных компаундов от микробиологической деструкции.

Проведенными в ГУП МосНПО «Радон» многолетними экспериментальными исследованиями [2–4] впервые доказано, что при длительном хранении в условиях приповерхностных хранилищ кондиционированных РАО (средняя температура в за-

висимости от сезона (+6...15) °С, влажность, затрудненный воздухообмен, отсутствие света) цементные компаунды с РАО населяют ассоциации микроорганизмов, способных использовать в качестве питательной среды компоненты РАО (целлюлозосодержащие фрагменты деревянной тары, ветоши, средств индивидуальной защиты, концентраты солей, минеральные масла, органические растворители). В процессе жизнедеятельности такие микроорганизмы выделяют газы, альдегиды, кислоты, снижающие иммобилизационные характеристики цементной матрицы за счет образования пор и микротрещин. Для предотвращения негативного воздействия микробиологического фактора при участии авторов разработаны [5, 6] комплексные цементные материалы, содержащие биоцидные добавки класса полигексаметиленгуанидинов (ПГМГ) [7], отличающиеся от ряда других эффективных биоцидов не только малыми подавляющими концентрациями и удобством дозирования, но и обнаруженным нами положительным влиянием на технологические параметры процессов цементирования.

Цементирование ЖРО с высокой степенью наполнения по отходам

Нами впервые обнаружено, что в присутствии 0,5...3 мас. % ПГМГ у цементных растворов на основе водных солевых жидких радиоактивных отходов (ЖРО), содержащих нитраты – питательную среду для развития денитрифицирующих бактерий, наблюдается отсутствие водоотделения при затвердевании компаунда и значительное увеличение прочности на сжатие. Таким образом, полимер ПГМГ не только является биоцидной добавкой, предотвращающей образование денитрифицирующими бактериями биогенных кислот и газов, но и позволяет при сохранении требуемых прочностных характеристик (5 МПа на 28 сутки твердения) готовить более жидкий цементный раствор с высоким раствороцементным (Р/Ц) отношением $R/C = m(ЖРО)/m(цемент+добавки) = 0,75...1,2$, где m – масса, г. Благодаря упрочняющему действию ПГМГ возможно включать в конечный компаунд большее количество ЖРО, сокращая за счет этого объем конечного компаунда, подлежащего длительному хранению (табл. 1).

Таблица 1. Влияние полимера ПГМГ на параметры цементирования водных солевых нитратсодержащих ЖРО (солесодержание 100 г/л)

| Р/Ц | Биоцид ПГМГ, мас. % | Сроки схватывания, ч | Водоотделение, об. % | Прочность на сжатие на 28 сут, МПа | Доля включенных отходов, мас. % | Снижение объема конечного компаунда* |
|------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 0,75 | – | 3...12 | 5...7 | 14,3 | 42,88 | – |
| | 0,5...1,0 | 0,5...2 | 0...0,2 | 28,7 | | – |
| 0,85 | 0,5...1,0 | 0,5...2 | 0,1...0,3 | 19,8 | 45,95 | – |
| | 1,0...3,0 | 0,25...1 | 0...0,01 | 29,7 | | на 9 % |
| 1,0 | – | 5...15 | 8...10 | 5,0 | 50,00 | – |
| | 0,5...3,0 | 3...4 | 0...0,3 | 9,8 | | на 15 % |
| 1,2 | – | 5...15 | 18...23 | –** | 54,55 | – |
| | 0,5...3,0 | 4...6 | 0,5...1 | 7,6 | | на 20 % |

*В сравнении с традиционным при Р/Ц=0,75, портландцемент марки М400 без добавок.

**Не измеряли, т. к. из-за большого водоотделения образцы дали большую усадку, изменилось Р/Ц.

Причины повышения прочности цементных компаундов в присутствии ПГМГ установлены нами по совокупности результатов рентгенофазового (РФА), петрографического и электронно-микроскопического (СЭМ) анализа.

Нами впервые установлено, что полимер ПГМГ влияет на характер гидратации алюминатов кальция в составе цементной матрицы. Так, в отсутствие ПГМГ на ранних сроках твердения (3–28 суток) фазовый состав цементной матрицы характеризуется преобладанием кубических кристаллов шестиводного трехкальциевого гидроалюмината $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ (C_3AH_6) с ровной гладкой поверхностью (рис. 1, а). С увеличением срока гидратации структура материала продолжает характеризоваться неоднородностью в кристаллизации гидроалюминатов кальция (CAH_{10} и C_2AH_8). В присутствии ПГМГ, наоборот, кристаллизуется только гексагональный десятиводный однокальциевый гидроалюминат кальция $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$ (CAH_{10}) (появляются рефлексы на дифрактограммах РФА d , Å: 8,080, 4,750, 3,675), и не образуется кубический шестиводный гидроалюминат кальция C_3AH_6 (отсутствуют пики d , Å: 5,140, 3,370, 2,820, 2,300).

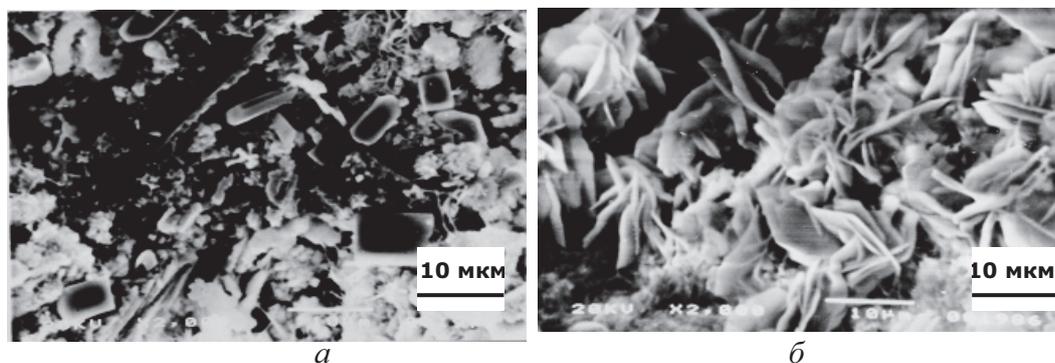


Рис. 1. Характер кристаллизации гидроалюминатов кальция в цементных компаундах на основе водных солевых нитратсодержащих ЖРО на 28 сутки твердения: а) C_3AH_6 , неоднородная структура; б) CAH_{10} , сетчатый каркас

Отсутствие кристаллизации кубического C_3AN_6 при включении в состав компаунда полимера ПГМГ и появление гексагональных пластин SAH_{10} подтверждается микрофотографиями СЭМ (рис. 1, б) и петрографическими исследованиями, показывающими, что в присутствии ПГМГ за счет прорастания между образованиями гидросиликата кальция пластинчатых зерен гидроалюмината кальция SAH_{10} микроструктуры цементной матрицы образуется сетчатый каркасом, что принципиально отличает микроструктуру образцов с добавкой. Для образцов с ПГМГ отмечена также большая доля волокнистых кристаллов, которые вкуче с сетчатым каркасом из пластин SAH_{10} «сшивают», самармируют структуру цементной матрицы. С увеличением возраста твердения каркасная структура, образуемая в присутствии полимера ПГМГ становится более плотной, значительно увеличивая прочность на сжатие цементных компаундов.

Цементирование радиоактивных масел с предварительным суспензированием

Эффект упрочнения цементной матрицы с помощью полимера ПГМГ оказывается полезен при цементировании загрязненных радионуклидами гидрофобных минеральных масел и органических жидкостей. Подобные органические материалы в составе цементного компаунда требуют биоцидной защиты с помощью ПГМГ, так как выступают субстратами для поселения и развития бродильных микроорганизмов, выделяющих кислоты и углекис-

лый газ. Кроме того, масла и органические растворители негативно влияют на твердение и набор прочности за счет обволакивания минералов цемента гидрофобной пленкой (рис. 2), препятствуя доступу воды для реакций гидратации и замедляя схватывание и твердение цементных компаундов. Отслаивание масла при перемешивании цементного раствора также создает технологические трудности в процессе цементирования ЖРО.

Биоцидное и упрочняющее действие полимера ПГМГ позволило включить данный полимер в состав комплексного цементного материала «БИЗОН-БПл» [8] и специального портландцемента с комплексными добавками «СПЦК» [9], разработанных с участием специалистов ГУП МосНПО «Радон». С применением данных цементных материалов разработаны и внедрены технология и опытно-промышленный модуль (рис. 3) цементирования масел и органических жидкостей [10].

Для повышения равномерности распределения масла готовится предварительная суспензия из радиоактивного масла и водных ЖРО с добавкой «БИЗОН-БПл» или «СПЦК», содержащих: бентонит, способный сорбировать масло, следовательно, уменьшать его содержание в жидкой фазе, а также сорбировать радионуклиды ^{137}Cs ; ультратонкомолотый высокомарочный быстротвердеющий цемент, который улучшает прочностные свойства конечного цементного компаунда; биоцидную и упрочняющую добавку ПГМГ, обеспечивающую микробиологическую защиту компаунда и способствующую

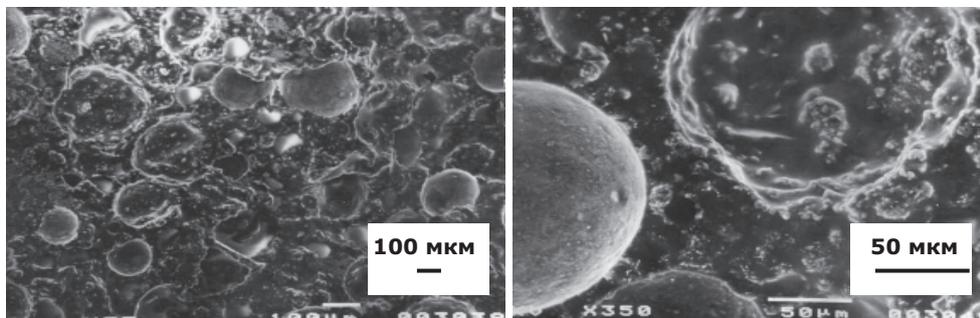


Рис. 2. Микроструктура цементных компаундов, содержащих 15 мас. % масла без добавок

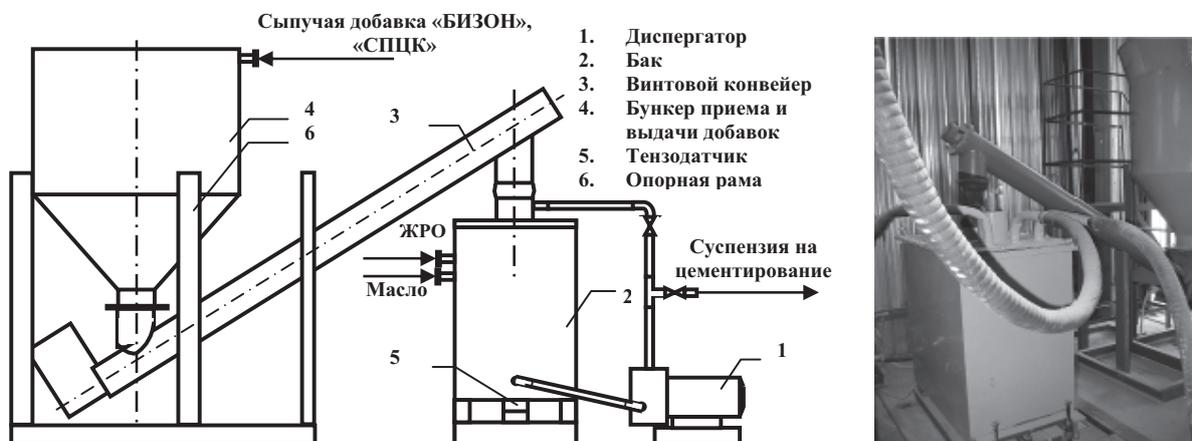


Рис. 3. Опытно-промышленный модуль для подготовки радиоактивного масла к цементированию

Таблица 2. Свойства цементных компаундов с радиоактивным маслом, приготовленных со специальными цементными материалами

| Состав цементного раствора (Р/Ц=0,7) | Свойства цементного раствора | | | Прочность на сжатие конечного компаунда, МПа | | |
|--------------------------------------|--|------------------|------------------------|--|---|----------------------|
| | Основной цементный материал + цементный материал в суспензии | Растекаемость мм | Отслоение масла, об. % | 28 сут. | После 30 циклов заморажив. – оттаивания | После 90 сут. в воде |
| 5 | Цемент+30 % СПЦК | >240 | 0 | 6,0 | 5,1 | 5,9 |
| | 70 % СПЦК+30 % СПЦК | 213 | 0 | 7,5 | 7,0 | 7,0 |
| 10 | Цемент+30 % СПЦК | 195 | 0 | 5,7 | 4,9 | 5,0 |
| | 70 % СПЦК+30 % СПЦК | 113 | 0 | 7,0 | 6,6 | 6,8 |
| 15 | Цемент+30 % СПЦК | 190 | 0,2 | 3,8 | 0,9 | 2,8 |
| | 70 % СПЦК+30 % СПЦК | 112 | 0 | 5,3 | 5,0 | 5,1 |

шую уплотнению микроstructures цементной матрицы.

Суспензия тщательно взбивается в баке с помощью диспергатора, создающего за счет фланцев-завихрителей турбулентный поток и пульсацию. Подготовленное радиоактивное масло в виде однородной устойчивой суспензии подается на установку цементирования в основной смеситель. Совместное цементирование водных солевых нитратсодержащих ЖРО и радиоактивного масла ведется при следующих параметрах: Р/Ц=0,7; включение радиоактивного масла – 5...15 мас. %; количество добавки «БИЗОН» или «СПЦК», вводимое в предварительную суспензию – 30 % от общей массы цементного материала; время приготовления предварительной суспензии 3...5 мин. Свойства цементных растворов и конечных компаундов, приготовленных по данной технологии, представлены в табл. 2.

Установлено, что при высоком наполнении цементного компаунда радиоактивными отходами (до 15 мас. % масла) удовлетворительных результатов (5,3 МПа) удается добиться только при приготовлении предварительной суспензии с полной заменой портландцемента на «СПЦК» или «БИЗОН-БПл».

Цементирование твердых радиоактивных отходов пропиткой

Авторами впервые установлено [11], что в присутствии биоцида ПГМГ снижается водоотделение цементного раствора и его проникающая способность, что позволяет использовать его в качестве важного компонента высокопроникающих цементных растворов при цементировании твердых радиоактивных отходов (ТРО) методом пропитки.

На цементирование поступают различные виды ТРО, в том числе, из-за недостатка сортировки, фрагменты горючих РАО (деревянная тара, средства индивидуальной защиты, ветошь и т. п.) в количестве до 2...5 мас. %. Целлюлозосодержащие материалы, некоторые виды пластика, гидролизующаясь под действием щелочной реакции цементного раствора, могут выступать субстратом для поселения и развития бродильных, денитрифицирующих, нитрифицирующих, сульфатредуцирующих

микроорганизмов, поэтому нуждаются в биоцидной защите при длительном хранении. ТРО, поступающие на цементирование, разнообразны по размерам – от крупнокусковых фрагментов размером 1...60 см снятого с эксплуатации оборудования, до насыпных мелкодисперсных грунтов или зольного остатка от сжигания РАО с размером частиц 5...150 мм.

Разработанный авторами новый метод цементирования ТРО пропиткой [12] заключается в том, что цементный раствор под давлением через зонд подают в донную часть контейнера с предварительно размещенными в нем ТРО. Цементный раствор, равномерно двигаясь снизу вверх по каналам между частицами ТРО, заполняет пустоты в насыщенном объеме отходов и, затвердевая, образует цементный компаунд, объем которого равен исходному насыпному объему.

При движении цементного раствора через насыпной слой ТРО первоначальное соотношение жидкой и твердой фаз цементного раствора меняется. Причины этого состоят в следующем. Поскольку цементный раствор представляет собой суспензию, то диспергированные в воде частицы твердой фазы в процессе пропитки способны оседать на цементируемом материале. Этот процесс может приводить к обеднению содержания цемента в растворе в последующих слоях пропитываемого материала, в результате чего в них будет цементный раствор с меньшим количеством цемента, с более высоким Р/Ц (например, исходный раствор с Р/Ц=0,6, на выходе – обедненный жидкий раствор с Р/Ц=0,8...1,0), что в конечном итоге ведет к ухудшению качества получаемого продукта. Кроме того, на входе оседающие частицы цемента забивают пустоты пропитываемого материала и препятствуют дальнейшему проведению процесса цементирования, еще более обедняя цементом проникающий в последующие слои раствор. Таким образом, надежность процесса цементирования пропиткой во многом определяется проникающей способностью раствора. Гарантией получения цементного компаунда требуемого качества по всему объему контейнера является заполнение пустот и пор отходов по всему насыпному объему и сохра-

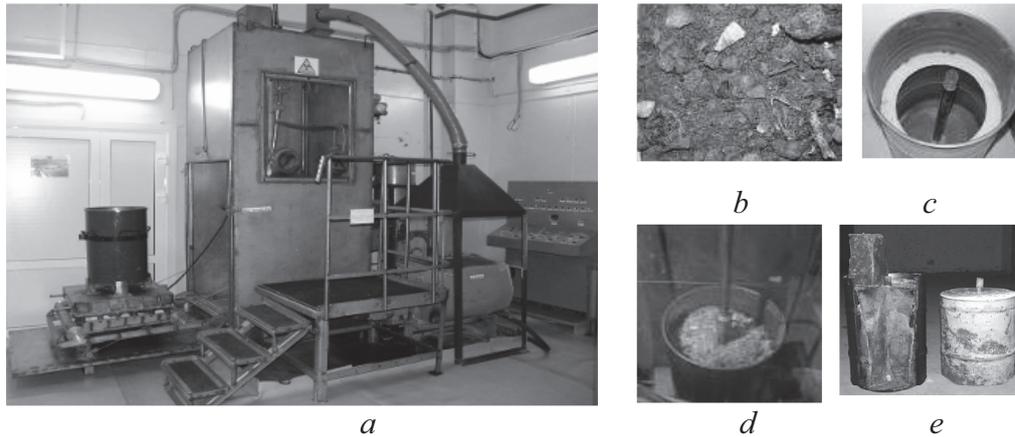


Рис. 4. Цементирование методом пропитки зольного остатка в 200-литровой бочке: а) опытно-промышленная установка; б) исходная радиоактивная зола; с, d) контейнер и зонд; е) конечный компаунд с наполнением по зольному остатку до 70 мас. %

нение свойств проникающего раствора в ходе цементирования.

Метод пропитки ТРО предполагает применение специального цементного материала, при использовании которого цементный раствор отличается высокой проникающей способностью и стабильностью. При цементировании пропиткой зольного остатка с размером частиц 0,5...8,0 мм используется «СПЦК» или «БИЗОН-БПл» с удельной поверхностью $S_{уд} = 6000...13000 \text{ см}^2/\text{г}$ и добавкой полимера ПГМГ в количестве 1...2 мас. %. Цементный раствор при $P/C=0,8...1,2$ подается под давлением 0,02...0,10 МПа (рис. 4), линейная скорость пропитки составляет 4...8 см/мин [13]. Точные значения параметров определяются по величине снижения плотности цементного раствора $\Delta\rho = \rho_{\text{в нижних слоях ТРО}} - \rho_{\text{вверху контейнера}}$ которая должна составлять не менее величины, гарантирующей образование компаунда с прочностью 5 МПа по всей высоте контейнера. Установлено, что допустимая $\Delta\rho$ цементного раствора в ходе пропитки зольного остатка составляет ~6 %.

Исследование влияния полимера ПГМГ на проникающую способность цементного раствора (способность раствора проникать по пустотам и каналам насыпного объема отходов, не изменяя соотношения твердой и жидкой фазы, т. е. не фильтруясь и не расслаиваясь) показало, что ПГМГ выступает стабилизирующим и водоудерживающим компонентом цементного раствора, что позволяет достичь большего массопереноса частиц цемента в верхние слои насыпного объема ТРО.

Лабораторные исследования проникающей способности проводили на экспериментальной установке, пропускающей многократно цементные растворы с ПГМГ и без ПГМГ под давлением 0,01 МПа через колонку объемом 0,36 л с мелкодисперсными ТРО. Приняв соотношение высоты к диаметру колонки равным 1,35, что соответствует параметрам 200-литровой стандартной бочки, считали один колоночный объем лабораторной установки элементарным объемом реального контейнера (рис. 5, а). Значения массопереноса цемента M_u рассчитывали по формуле $M_u = m_u / (V_{ст} t)$, где m_u – масса твердой фазы, прошедшей через элемен-

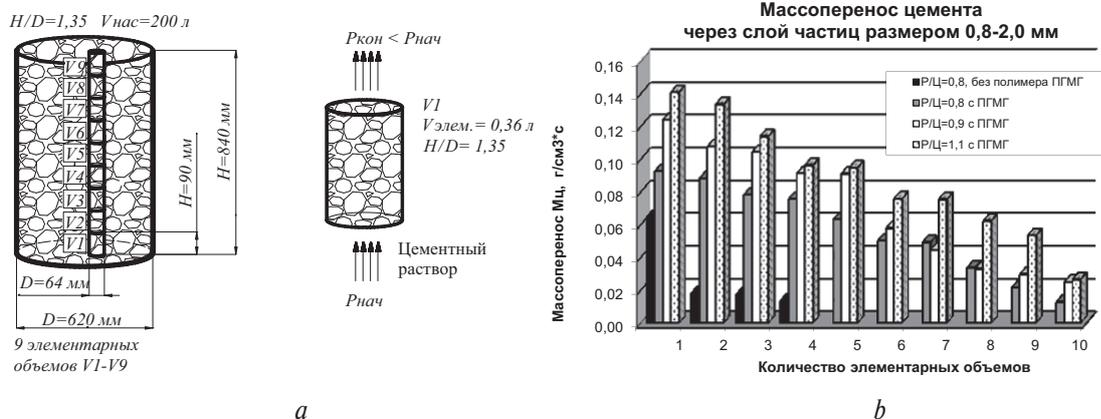


Рис. 5. Проникающая способность цементных растворов в присутствии полимера ПГМГ: а) моделирование элементарного объема пропитываемого материала; б) массоперенос частиц цемента через насыпной слой ТРО (размер частиц 0,8...2,0 мм)

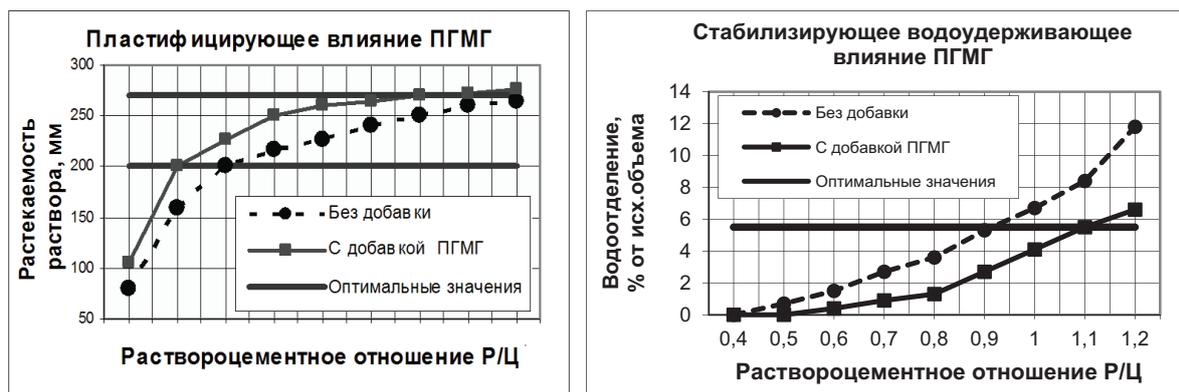


Рис. 6. Пластифицирующие и водоудерживающие свойства полимера ПГМГ

тарный объем, г; $V_{св}$ – свободный объем в элементарном объеме при данной пустотности, $см^3$; t – время прохождения раствора через элементарный объем, с.

Водоотделение цементного раствора в статических условиях определяли по ГОСТ [14], пластифицирующее влияние ПГМГ определяли по увеличению растекаемости цементного раствора в присутствии данного полимера по методике [15], результаты представлены на рис. 6.

Данные рис. 6 подтверждают, что полимер ПГМГ повышает проникающую способность цементных растворов в 2...2,5 раза, растекаемость в 1,2 раза, стабильность консистенции в 1,5...1,7 раза, расширяя рабочий диапазон Р/Ц до 0,5...1,1.

Выводы

Показано, что применение биоцидного полимера класса полигексаметиленгуанидинов в техно-

логиях цементирования жидких и твердых радиоактивных отходов низкой и средней активности позволяет не только предотвратить биодеструкцию цементных компаундов при длительном хранении в приповерхностных хранилищах, но и улучшить ряд важных технологических параметров процесса цементирования, повысить прочностные свойства конечного продукта, увеличить степень наполнения по отходам конечных компаундов и расширить ассортимент радиоактивных отходов, принимаемых на цементирование.

Работа частично выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Госконтракт № П755 от 20.05.2010).

Автор приносит искреннюю благодарность коллективу сотрудников ГУП МосНПО «Радон» под руководством к.т.н. А.П. Варлакова за совместные лабораторные и опытно-промышленные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
- Горбунова О.А. Защита зацементированных РАО от микробиологической коррозии // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 3. – С. 126–130.
- Горбунова О.А. Состояние гидратированных цементных минералов под действием биокоррозии // Вестник МГСУ. – 2010. – № 3. – С. 76–81.
- Gorbunova O.A., Sukhov A.A., Barinov A.S. Biocorrosion of Cemented Radioactive Waste // Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes (KONTEC'2011): 10th Intern. Symp. – Dresden, April, 06–08, 2011. – on CD-ROM. – P. 634–638.
- Баринов А.С., Варлаков А.П., Горбунова О.А. Модифицирующие комплексные добавки в технологиях цементирования радиоактивных отходов // Медицина труда и промышленная экология. – 2006. – № 2. – С. 29–34.
- Биоцидный цементный раствор: пат. 2197760 Рос. Федерация. № 2001111084; заявл. 25.04.01; опубл. 27.01.03, Бюл. № 3. – 12 с.
- Гембицкий П.А., Воинцева И.И. Полимерный биоцидный препарат класса полигексаметиленгуанидинов. – Запорожье: Полиграф, 1998. – 44 с.
- ТУ 5743-159-46854090-2003. Комплексная добавка проникающего и защитного действия «БИЗОН». Технические требования.
- ТУ 5734-001-56873527-2006. Специальный поргланцемент с композиционной добавкой «СПЦК». Технические требования.

- Способ цементирования жидких радиоактивных отходов, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости, и устройство для его осуществления: пат. 2317605 Рос. Федерация. № 2006123654; заявл. 04.07.06; опубл. 20.02.08, Бюл. № 5. – 25 с.
- Горбунова О.А. Цементирование твердых радиоактивных отходов методом пропитки высокопроницаемыми растворами: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 269 с.
- Способ цементирования твердых радиоактивных отходов, содержащих мелкозернистые материалы: пат. 2142657 Рос. Федерация. № 98117020; заявл. 03.09.98; опубл. 10.12.99, Бюл. № 34. – 7 с.
- Устройство для цементирования пропиткой мелкодисперсных радиоактивных и токсичных отходов: пат. 2199164 Рос. Федерация. № 2001110423; заявл. 18.04.01; опубл. 20.02.2003, Бюл. № 5. – 11 с.
- ГОСТ 10181-2000. Смеси бетонные. Методы определения растекаемости. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
- МВИ-144-08. ФР.127.2009.05740. Определение растекаемости цементных растворов методом линейных измерений с помощью прибора «Конус АЗНИИ КР-1» / Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон», разработ. О.А. Горбунова, утв. А.С. Баринов, Аттестат Аккредитации № РОСС RU.0001.512711 от 09.11.2010 (действ. до 09.11.2015), инв. № 811. – Сергиев Посад, 2008. – 9 с.

Поступила 15.06.2011 г.