

- reactors using lead and lead-bismuth coolants. — In: Proc. Intern. Conf. on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology. Obninsk, 1999, v. 2, p. 737—745.
3. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Проблемы создания и модификации нержавеющей сталей для деталей активных зон реакторов на быстрых нейтронах и термоядерного реактора синтеза. — Физика и химия обработки материалов, 2001, № 5, с. 5—13.
4. Глазов А.Г., Леонов В.Н., Орлов В.В. Реактор БРЕСТ и пристанционный ядерный топливный цикл. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 1, с. 15—21.
5. Зеленский Г.К., Иванов Ю.А., Иолтуховский А.Г. и др. Способы защиты оболочки твэла от коррозии в свинцовом теплоносителе и теплопередающем подслое. — Там же, 2008, т. 104, вып. 2, с. 88—94.

Поступила в Редакцию 8.12.11

УДК 621.039.73.666.94

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ПУЛЬПЫ ИЗ ЕМКОСТЕЙ-ХРАНИЛИЩ ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Лебедева А.В., Науменко Н.А., Суханов Л.П. (ОАО ГНЦ «ВНИИИМ», г. Москва),
Мацеля В.И. (Горно-химический комбинат, г. Железнодорожск, Красноярский край)

В настоящее время на Горно-химическом комбинате выводят из эксплуатации емкости-хранилища гидроксидной пульпы радиохимического завода в связи с исчерпанием проектного ресурса. В емкостях-хранилищах накоплено несколько тысяч м³ пульпы сложного химического состава — полиуранаты и гидроалюмокарбонаты натрия, полимеризованный гидроксид плутония, гидроксиды Fe, Cr, Mn и Ni, полимеризованная кремниевая кислота, ферроцианиды никеля и цезия. Содержание твердой фазы составляет 100 ± 60 г/л, β -активность, определяемая, в основном, ⁹⁰Sr, находится в пределах $3,7 \cdot 10^{10} \pm 1,85 \cdot 10^{10}$ Бк/кг. Наиболее радиационно опасными в условиях долговременного хранения пульпы в емкостях являются ¹³⁷Cs и ²³⁹Pu.

Вывод емкостей-хранилищ из эксплуатации предусматривает:

операции, проводимые в настоящее время, — извлечение пульпы из емкостей-хранилищ, обработка кислыми реагентами для растворения твердой фазы, экстракционное выделение урана и плутония, сбор и временное хранение нерастворимых остатков пульпы;

планируемые операции — иммобилизация нерастворимых остатков в твердой водостойкой матричной композиции (цементном компаунде) для надежной локализации радионуклидов, безопасное долговременное хранение цементного компаунда.

Настоящая работа посвящена разработке технологии и оборудования иммобилизации нерастворимых остатков, образовавшихся в результате кислотной обработки исходной пульпы

из емкостей-хранилищ. Выбор цементирования обусловлен его преимуществами по сравнению с другой технологией кондиционирования жидких радиоактивных отходов:

способность цементной матрицы удерживать уран и плутоний за счет образования комплексных соединений;

возможность закрепления наиболее подвижного ¹³⁷Cs в цементной матрице с помощью сорбционных добавок;

относительная простота оборудования, поскольку цементирование проводится при низкой температуре;

доступность и невысокая стоимость матричных материалов;

отсутствие вторичных отходов.

Разработчиками технологии являются ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара и Горно-химический комбинат.

Безопасность последующего хранения (захоронения) цементированной пульпы будет определяться следующими барьерами: матричная композиция (цемент + сорбционные добавки), контейнер (200-литровые бочки и элементы их размещения), инженерные сооружения хранилища, массивный слой скальных пород (хранилище будет располагаться на глубине около 200 м). Качество получаемого в результате отверждения пульпы цементного компаунда должно соответствовать требованиям нормативных документов по механической прочности, выщелачиванию радионуклидов, устойчивости к радиационному воздействию, водоустойчивости и морозостойкости [1, 2].

Помимо нормативных критериев качества, необходимо учитывать некоторые другие параметры. К ним, в частности, относятся растекаемость компаунда на стадии приготовления (растекаемость должна быть достаточной для выгрузки из смесителя) и тепловыделение при затвердевании (повышение температуры более 90 °С может привести к ухудшению свойств компаунда). При цементировании также важно, чтобы выгружаемый из смесителя цементный компаунд был однородным. Для снижения расходов на последующее хранение (захоронение) отвержденных жидких радиоактивных отходов необходимо минимизировать объем цементного компаунда за счет максимально возможного включения жидких радиоактивных отходов.

Следует отметить следующую специфику пульпы, влияющую на технологические параметры цементирования: многокомпонентный химический состав, значительное содержание долгоживущих нуклидов, возможность взаимодействия некоторых компонентов пульпы с цементом (гидроксиды Fe, Al, Mn, Ni, Cr), необходимость дистанционного обслуживания установки вследствие относительно высокой активности пульпы.

Для разработки цементирования нерастворившихся остатков гидроксидной пульпы из емкостей-хранилищ необходимо было решить следующие задачи:

проанализировать исходные характеристики пульпы и выбрать представительные модельные системы для последующих лабораторно-стендовых проработок;

изучить влияние состава пульпы, вида вяжущего (цемент различных марок, шлакопортландцемент), сорбционных добавок (бентонит, клиноптилолит), водовязущего отношения на технологические параметры и свойства цементного компаунда;

разработать на основе экспериментальных данных оптимальный состав цементного компаунда нормируемого качества;

определить оптимальные параметры технологического режима цементирования, обеспечивающие получение цементного компаунда нормируемого качества и устойчивую работу установки цементирования.

Методика экспериментов. Для разных матричных композиций, отличающихся составом, водовязущим отношением, степенью вклю-

чения пульпы, видом вяжущего и добавок, были определены основные характеристики компаунда, определяющие его качество, — механическая прочность, выщелачиваемость радионуклидов, водоустойчивость, морозостойкость, растекаемость (пластичность), тепловыделение при затвердевании. Основные исследования были проведены в лабораторных условиях ВНИИНМ на двух видах имитаторов пульпы, отличающихся соотношением гидроксидов и оксидов кремния (см. таблицу). Качество цементного компаунда определяли через 7, 14, 28, 56 и 90 сут испытаний. В экспериментах использовали следующие вяжущие материалы и сорбционные добавки: портландцемент марки 500-Д0, шлакопортландцемент марки ШПЦ 400, бентонитовую глину М4Т1К, клиноптилолит Холинского месторождения с содержанием частиц размером >1, до 0,5, 0,25, 0,125, <0,125 мм, % по массе: 22,16, 43,58, 10,2, 21,52, 2,54 соответственно, суперпластификатор С-3.

Состав имитаторов гидроксидной пульпы

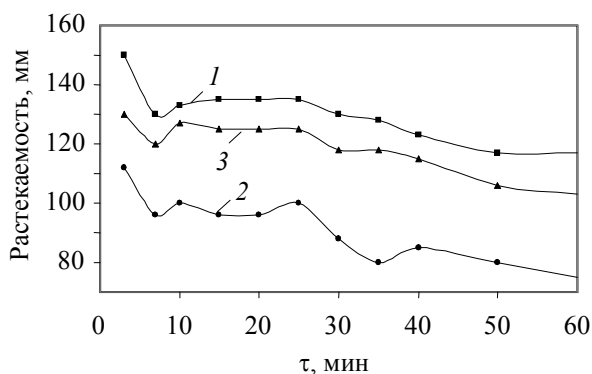
Компонент пульпы	Содержание компонентов в нерастворимом осадке, % по массе	
	Состав 1	Состав 2
Al(OH) ₃	11,3	9,1
Fe(OH) ₃	27,8	22,5
Cr(OH) ₃	2,3	1,9
Mn(OH) ₂	38,1	30,8
Ni(OH) ₂	14,2	11,4
SiO ₂	6,3	24,3

В ходе исследований варьировали состав цементируемой пульпы, тип вяжущего, степень наполнения компаунда, водовязущее отношение. Образцы цементного компаунда размером 2×2×2 см помещали в воздушно-влажные условия для твердения.

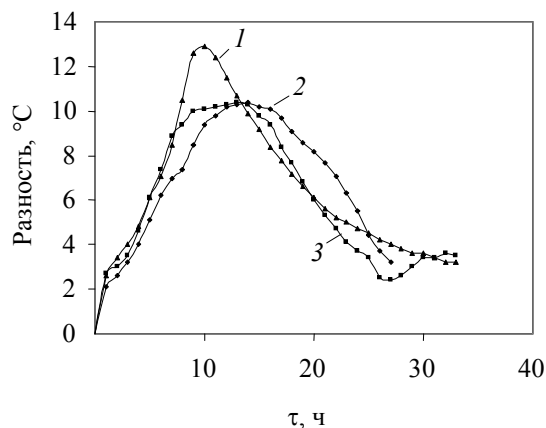
Некоторые эксперименты на образцах реальной пульпы плотностью 1,55 г/см³, влажностью 51,3% были проведены в лаборатории радиохимического завода Горно-химического комбината, для чего из емкости-хранилища отобрали пробу объемом около 2 л. Проба представляла собой неоднородную массу, образованную слипшимися агломератами частиц.

Результаты экспериментов и обсуждение.

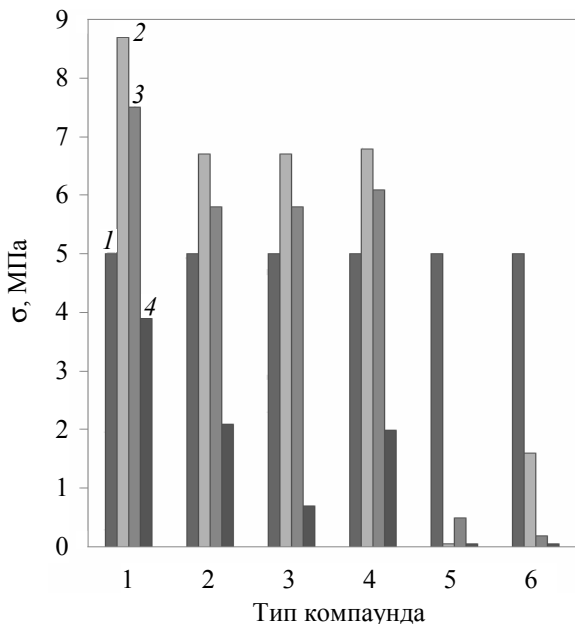
По результатам лабораторных исследований были сделаны следующие выводы (рис. 1—4) [3, 4]:



Р и с. 1. Влияние степени наполнения компаунда 3 (1), 5% сухого остатка (2) и водовязущего отношения 0,7 (1), 0,65 (3) на растекаемость цементного теста (имитатор пульпы)

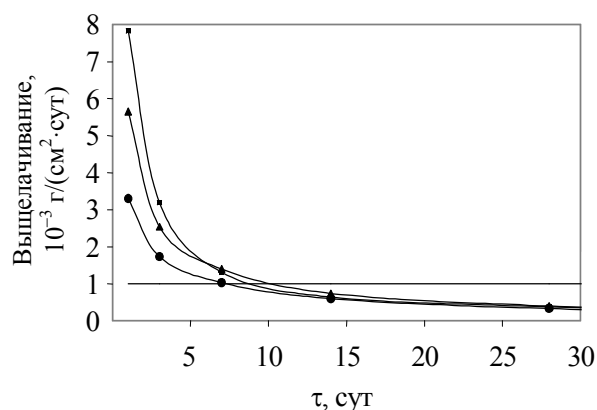


Р и с. 2. Влияние содержания пульпы в цементном компаунде 8 (1), 0 (2), 4% (3) на тепловыделение в процессе гидратации цемента (имитатор пульпы)



Р и с. 3. Влияние степени наполнения компаунда нормированное (1), 4,5 (2), 9 (3), 40% (4) на механическую прочность (пульпа из емкостей-хранилищ)

портландцемент и шлакопортландцемент с применением в качестве сорбционной добавки клиноптилолита или бентонита можно ис-



Р и с. 4. Выщелачивание ¹³⁷Cs из образца 1 (■), 2 (▲), 3 (●) и нормированное (—) через 90 сут (пульпа из емкостей-хранилищ)

пользовать в качестве матричного материала для иммобилизации нерастворимых остатков пульпы;

все рекомендуемые составы цементных компаундов удовлетворяли нормативным требованиям по механической прочности, водоустойчивости, морозостойкости и выщелачиванию радионуклидов;

оптимальные параметры цементирования — водовязущее отношение 0,65—0,8, растекаемость (пластичность) 110 ± 10 мм, клиноптилолит в качестве сорбционной добавки, что обеспечивает наибольшую механическую прочность цементных компаундов, шлакопортландцемент в качестве вяжущего, клиноптилолит в качестве сорбционной добавки для снижения тепловыделения [5].

Испытание установки цементирования с пульсационным смесителем, разработанной во ВНИИНМ. Преимуществами установки являются отсутствие мешалки и гарантированный слив цементного компаунда из смесителя [6, 7]. Целями испытаний являлись проверка возможности получения однородной цементной смеси соответствующего качества и подготовка рекомендаций для технологических параметров процесса.

Эксперименты проводили следующим образом. В смеситель установки цементирования заливали пульпу-имитатор и при постоянном перемешивании в течение 20 мин подавали смесь портландцемента или шлакопортландцемента и бентонита (10% по массе). После загрузки всех компонентов компаунд перемешивали в течение 5 мин, после чего сливали. В начале, середине и конце слива отбирали пробы

для определения растекаемости. Затем определяли механическую прочность после 7, 14, 28, 56 и 90 сут испытаний, водостойчивость, морозостойкость, выщелачивание радионуклидов.

Испытания показали:

при использовании смесителя пульсационного типа возможно получение гомогенной цементной смеси растекаемостью 130—135 мм, обеспечивающей выгрузку компаунда в контейнер;

цементный компаунд отвечает нормативным требованиям по качеству.

Следующим шагом будет создание полномасштабной опытной установки цементирования и ее испытание по отверждению имитаторов нерастворимых остатков из емкостей-хранилищ гидроксидных пульп радиохимического завода Горно-химического комбината.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Отходы** радиоактивные цементированные. Общие технические требования. ГОСТ Р 51883—2002. М.: Госстандарт России, 2002. 7 с.
2. **Сбор**, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019—2000. М.: Изд-во стандартов, 2000.
3. **Захарова К.П., Лебедева А.В., Суханов Л.П. и др.** Разработка технологии и оборудования цементирования пульп сложного состава из емкостей-хранилищ ФГУП «ГХК». Тезисы 2-й Всерос. научно-технич. конф. «Сибирь атомная. XXI век». Железногорск, 2010, с. 223.
4. **Sukhanov L.P., Zakharova K.P., Naumenko N.A. et al.** Research of cementation of pulps having a complex physicochemical composition and stored in tanks of the mining and chemical combine. — In: Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage. France, 2012, p. 13—19.
5. **Крылов Б.А.** Воздействие температуры на структуру и свойства бетона. — Технология бетонов, 2006, № 3, с. 22—23.
6. **Дьяков В.С., Кудрявцев Е.Г., Наumenko Н.А. и др.** Установка цементирования жидких радиоактивных отходов. Патент РФ № 77096, 27.05.08. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2008, № 28, с. 1339.
7. **Дьяков В.С., Мацеля В.И., Наumenko Н.А. и др.** Установка для отверждения жидких радиоактивных отходов. Патент РФ № 94371, 29.04.09. — Там же, 2010, № 14, с. 1166.

Поступила в Редакцию 31.08.12

УДК 621.039.746

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЗАКТИВАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ НА МАКЕТЕ ИМПУЛЬСНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА АБРАЗИВНЫМ ОБДУВОМ

Воронин Д.В., Истомин В.Л., Хлебус К.А.

(Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск)

При переработке отработавшего ядерного топлива одной из приоритетных задач является дезактивация оборудования (аппаратов и трубопроводов), загрязненного радиоактивными веществами [1]. Радиоактивное загрязнение поверхности конструкционных материалов обусловлено их контактом как с газовой, так и с жидкой средой. В первом случае загрязнение происходит за счет адгезии, когезии, определяющихся силами сцепления молекул, ионов, атомов соприкасающихся тел, во втором радиоактивные частицы осаждаются на поверхность под действием гравитационных сил, броуновского движения, ионного обмена, электростатического притяжения, хемосорбции, гидродинамических факторов [2].

Применяющиеся в настоящее время методы дезактивации основаны, как правило, на обра-

ботке загрязненных материалов растворами, содержащими специально подобранные реагенты [3—6]. Однако данный метод не всегда позволяет получить требуемую степень очистки материала, поэтому необходимо либо интенсифицировать процесс электрофизическими методами, либо влиять на сам процесс загрязнения материалов. Электрофизические методы (ультразвук, электрогидравлический эффект и др.) предусматривают применение специальной аппаратуры, позволяющей проводить процесс в сравнительно небольшом замкнутом объеме, что исключает возможность их использования для обработки поверхностей большой площади, в том числе трубопроводов [2—7]. Основным методом дезактивации такого оборудования заключается в многостадийной системе отмывки загрязненных внутренних поверхностей растворами