DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-28-37 УДК 621.039.(58:7)

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ МОДУЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ППЗРО ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМИ ПОЛИМЕРАМИ

И. М. Игин[1], А. В. Минин[1], Е. В. Кузьмин[1], М. Ю. Бамборин[1], А. А. Зубков[2], Ю. В. Трофимова[1]

[1]ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

[2]АО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 12 января 2023 г.

Результаты исследований высокомолекулярных соединений, их взаимосвязи с другими материалами, а также их модификация различными добавками инициировали создание технологий, применение которых позволяет управлять процессами адсорбции на границе раздела фаз и полимеризации в условиях термического воздействия. Разработана методика нанесения на бетонные и металлические поверхности термопластичного полимера класса полиолефинов (полиэтилена), обладающего высокими адгезионными характеристиками, стойкостью к истиранию, коррозии и другим разрушающим факторам. Улучшенные характеристики позволяют рассмотреть данный полимер в качестве дополнительного изолирующего материала инженерных барьеров безопасности при захоронении РАО 3 и 4 классов в приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, пункт захоронения радиоактивных отходов, полиэтилен, модификатор, адгезия к стали, адгезия к бетону, химическая инертность, полимерное покрытие, газопламенное напыление, контроль качества покрытия.*

Твердые и отвержденные радиоактивные отходы (РАО) 3 и 4 классов могут захораниваться в приповерхностных пунктах захоронения (ППЗРО), представляющих собой заглубленные или частично заглубленные модульные сооружения, выполненные из монолитного железобетона. В зависимости от радиационных характеристик РАО могут размещаться в ППЗРО в металлических или железобетонных контейнерах с установкой в несколько ярусов. Необходимый срок их изоляции составляет несколько сотен лет. Период до начала разрушения бетонных стен, днища и перекрытий модульного сооружения — 100 лет. Для обеспечения необходимого времени изоляции РАО, особенно содержащих долгоживущие радионуклиды, в ППЗРО требуется дополнительная защита как от внешнего воздействия подземных вод, агрессивных, кислых, щелочных растворов, так и от внутреннего разрушения, связанного с процессами, происходящими внутри контейнеров с РАО.

Применение полимерных материалов распространено во многих отраслях промышленности. Они классифицируются по химическому составу: органические (полиолефины), неорганические (пластическая сера, кристаллы кварца

и др.), элементоорганические, состоящие из углеродных групп и неорганических звеньев (кремний-, боро-, фосфорорганические и др.).

Основные требования к материалам защитных покрытий — гидроизоляция, высокая адгезия к бетону и металлам, химическая стойкость, технологичность процесса нанесения на поверхность, долговечность, невысокая стоимость. Данным характеристикам в наибольшей степени отвечают полимеры класса полиолефинов — полиэтилен и полипропилен. Эти наиболее промышленно распространенные высокомолекулярные соединения обладают химической инертностью, водостойкостью и невысокой стоимостью.

Благодаря расширению областей применения полимеров перечень их модификаций значительно диверсифицирован добавками для объединения в одном композиционном материале свойств нескольких из них с разной химической природой. Разработанные модифицированные полимеры требуют комплексных исследований структуры, анализа закономерностей склеивания, молекулярной диффузии, сварки для оценки механизмов адгезии, возможности разработки методов управления ее процессами на границе раздела фаз адгезив — субстрат, протекающими при производстве и эксплуатации изделий. Установлено, что топология процесса адгезионной связи состоит из межмолекулярного взаимодействия и усиливается при капиллярной конденсации паров, обеспечивающей активное протекание химических процессов, гарантирующих образование связи на границе раздела контактирующих фаз (рис. 1) [1]—[3].

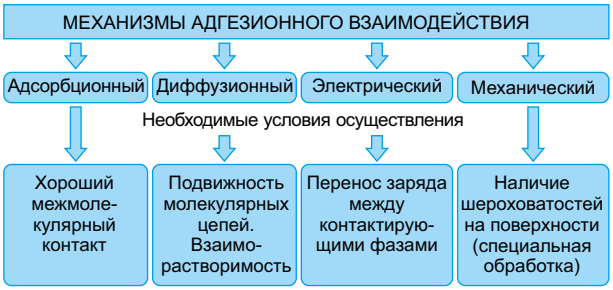

Рис. 1. Адгезионное взаимодействие полимера с поверхностью субстрата

Для систем «сталь — полиолефины» установлено образование химически сложной межфазной переходной зоны с комбинированным структурно-механическим, структурно-градиентным, концентрационно-градиентным строением. Данная зона формируется в результате термического окисления расплава полиолефина, реакция катализируется поверхностью металла. Доказано, что для формирования адгезионного контакта на границе раздела фаз «металл — полимер» главными являются адсорбционные взаимодействия кислотно-основных (донорно-акцепторных) групп [1], [2].

В зависимости от решаемой задачи полимерам придаются определенные свойства путем введения специальных добавок. Имеется несколько методов введения добавок — полярных групп — в полиолефины. Предпочтительным является промышленный синтез сополимеров заданного строения (СЭВАМА, СЭАК, СЭБА).

При объективных затруднениях в промышленном производстве «пришивание» полярных групп к молекулам полиолефина можно провести методом графтинга — реакцией радикальной модификации расплава полимера в экструдере (рис. 2).

Рис. 2. Экструдер для расплавления полимера и смешивания с добавками

Полиэтиленовая основа составляет 80—90% массы покрытия. Функциональные добавки — 10—20% (пигменты, стабилизаторы, наполнители, компатибилизаторы) — улучшают адгезивные, прочностные свойства, устойчивость композитов во времени. Ряд добавок (диоксид титана, дискретные углеродные, базальтовые волокна и др.) являются универсальными, совмещают в себе функции химически стойкого наполнителя и соединения, снижающего усадку материала, а также сохранение свойств во времени. Это позволяет увеличить срок долговременной изоляции защищаемых объектов от внешних воздействий, снизить себестоимость покрытия.

На основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) разработана технология получения порошкового композита с использованием функциональных добавок для нанесения защитных антикоррозионных покрытий на поверхности бетонных и стальных конструкций, контактирующих с водой, водными растворами кислот, щелочей, солей, ПАВ и биологических соединений.

Процесс состоит в получении из экструдера нитей модифицированного полимера и их делении на гранулы. В мельницах производится дробление гранул до состояния порошка с размером частиц 140—315 микрон (рис. 3).

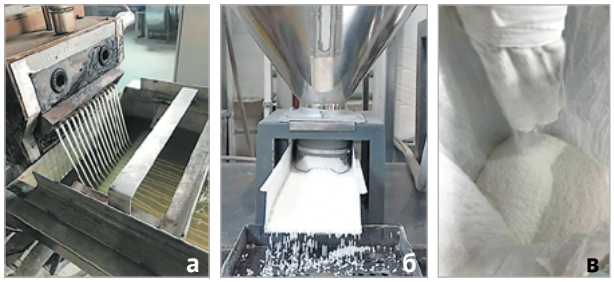

Рис. 3. Стадии приготовления полимерного композита: а) получение из экструдера нитей модифицированного полиэтилена, б) получение гранул, в) измельчение гранул до состояния порошка с размером частиц 140—315 мкм

Наряду с полимерным композитом для комплексной защиты бетонных сооружений используется двухкомпонентный эпоксидный праймер (подготовка поверхности). Первичная обработка: нанесение его первого слоя и высыхание для обеспечения адгезии с бетонной поверхностью. Далее наносится второй слой праймера, назначение которого — обеспечение адгезии с используемым в дальнейшем термопластичным полимерным композитом.

После этого методом газопламенного напыления наносится термопластичный полимерный композит (рис. 4). При этом используется установка с подачей воздуха и пропана.

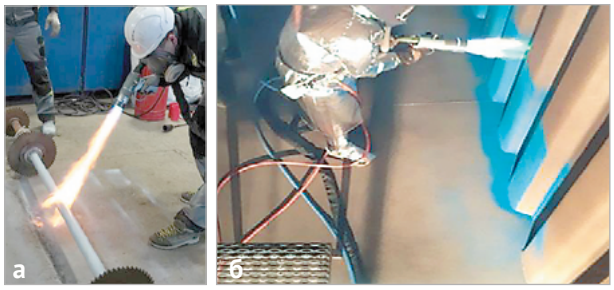

Рис. 4. Газопламенное пневматическое напыление полимерного покрытия: а) антикоррозионное покрытие металлического анкера, б) гидроизолирующее покрытие бетонной стены

Технология этого процесса:

1) подготовка поверхности объекта (очистка, нанесение праймера на бетонную поверхность);

2) предварительный прогрев поверхности пламенем до температуры 150—200 °С (при нанесении композита на металлическую основу);

3) газопламенное напыление полимерного порошка на поверхность объекта;

4) визуальный и инструментальный контроль качества слоя покрытия (сплошность, толщина), устранение дефектов;

5) нанесение второго и последующих слоев (при необходимости).

Установка газопламенного пневматического напыления полимерного композита разработана для покрытия габаритных объектов и обработки труднодоступных мест, а также нанесения на горизонтальные, вертикальные, наклонные поверхности. При этом используется регулируемое воздушно-пропановое пламя с коррекцией скорости распыления и расхода полиэтиленового (полипропиленового) композита.

Суммарная толщина защитного слоя (два слоя праймера + покрытие) достигает 1,0 мм (при нанесении в один слой). Адгезия с бетоном составляет не менее 10,2 кг/см^2 согласно СП 72.13330.2016. При необходимости возможно напыление двух-трех и более слоев для обеспечения большей толщины покрытия. Вместе с нанесенным праймером оно получается герметичным, стойким к агрессивным средам, обладает высокими диэлектрическими свойствами.

Размер частиц влияет на толщину и однородность покрытия, расход полимерного композита. При одинаковых температуре и времени нагрева частицы диаметром более 400 мкм могут не полностью перейти в высокоэластическое состояние в сравнении с частицами 150—200 мкм. Это приведет к бугристости поверхности, снизит ее прочность. С другой стороны, частицы менее 100 мкм могут переходить в вязкотекучее состояние и вследствие этого частично теряться с потоком воздуха. Требуется тщательная регулировка подачи пропана и воздуха. Общая толщина системы «бетон — покрытие» 1—5 мм (рис. 5).

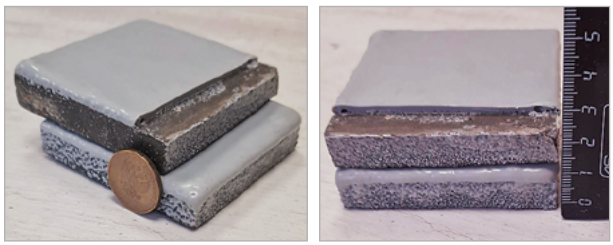

Рис. 5. Образцы полимерного (ПЭВП) покрытия слоем толщиной 1—5 мм, нанесенного на бетонные плитки методом газопламенного напыления

Для замедления старения покрытия, предотвращения образования трещин и подпленочной коррозии в полимер, предназначенный для нанесения на бетонные поверхности в

атмосферных условиях, перед изготовлением вводят УФ-адсорберы и УФ-стабилизаторы (УФ — ультрафиолет). Добавки распределяются в материале максимально равномерно, т. к. в заводских условиях в расплавленную при высокой температуре полиэтиленовую основу они вводятся с активным перемешиванием. Из открытых источников известно, что период сохранения изолирующих свойств полимерных композитов (до начала разложения) может достигать 200 лет [14].

На основе ПЭВП также разработан и сертифицирован порошковый композит для нанесения защитных покрытий на поверхности стальных конструкций, контактирующих с водой, водными растворами кислот, щелочей, растворами солей, ПАВ и биологических соединений, которые устойчивы к атмосферным воздействиям, резким сменам влаго-температурных условий, имеют высокую степень электрической изоляции. Покрытия толщиной 0,5—0,8 мм получают, согласно требованиям ГОСТ 9.410, по следующей технологии: металлические заготовки с очищенной и фосфатированной поверхностью нагревают и погружают в «кипящий» слой (аэродисперсию) полимерного порошка, далее продолжают тепловую обработку до полного расплавления прилипшего порошка на металле.

Для проверки качества изолирующих покрытий на металле и других электропроводящих основаниях используется электроискровой дефектоскоп с щеточным электродом. Он позволяет выявить на большой площади сухой заготовки дефекты: поры, трещины, пустоты, инородные включения, неравномерности толщины слоя в диапазоне от 200 мкм до 7 мм — как технологические (образованные при нанесении), так и эксплуатационные. Электроискровой дефектоскоп позволяет проверять внутреннюю и наружную поверхности конструкций (рис. 6а). Максимальное рабочее напряжение на электроде — 30 кВ.

Контроль толщины полимерного покрытия в диапазоне 0—5 мм, нанесенного на поверхность бетона, осуществляют толщиномером, магнитным (на ферромагнитном основании) или ультразвуковым (рис. 6б).

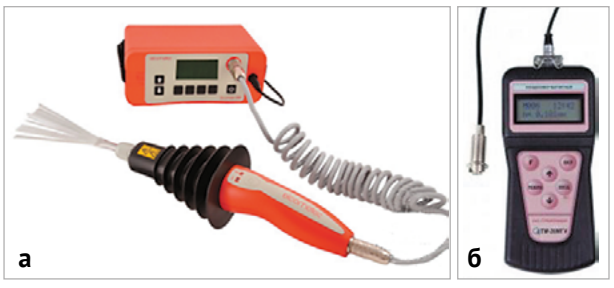

Рис. 6. Приборы проверки качества полимерных покрытий: а) электроискровой дефектоскоп, б) магнитный толщиномер

Свойства полимерных композитов зависят от подбора компонентов, функциональных добавок; пример исследования прочности при растяжении приведен на рис. 7.

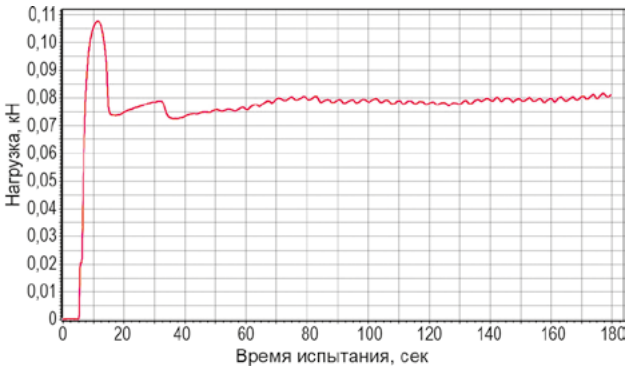

Рис. 7. Прочность образцов полимерных композитов при растяжении

Способность полимеров под действием радиации структурироваться, поглощая энергию ионизирующих излучений, существенно снижает риск воздействия радиоактивных отходов на окружающую среду. К таким относится полиэтилен. Он богат водородом, эффективно защищает от быстрых нейтронов, которые при столкновении с атомами водорода теряют энергию и замедляются. После этого они не способны спровоцировать ионизацию. Для нейтронной защиты в полиэтилен добавляют бор, он поглощает медленные тепловые нейтроны [15], [16].

Существует стандарт для проведения испытаний материалов типа «Эмаль для атмосферостойкого радиационно стойкого дезактивируемого противообрастающего грибостойкого покрытия» (патент RU № 2703636, 2018 г.) [17]. Характеристики полимерного композита (на основе ПЭВП) для покрытия бетонных и металлических поверхностей приведены в соответствие требованиям показателей данного стандарта (табл. 1).

Считается, что «радиационное воздействие оказывает влияние в наибольшей степени на цементосодержащие матрицы с отвержденными ЖРО внутри контейнеров, наименьшее (практически полное отсутствие радиационного фактора) — на строительные конструкции ППЗРО» [18]. Следовательно, при высокой радиационной стойкости полиэтилена (10^6 Гр) не будет происходить деструкция материала покрытий на поверхности строительных конструкций ППЗРО, но это необходимо подтвердить дополнительным комплексом исследований.

Таблица 1. Характеристики полимерного композита для покрытия бетонных и металлических поверхностей

Наименование показателя	Значение показателя (оценка/ метод испытаний полимера)
Условия эксплуатации покрытия	Морской умеренно-холодный, морской тропический — ОМ (ГОСТ 9.104-79)
Обрастание, балл/мес.	4/12 (ГОСТ РВ 9.412-2001)
Грибостойкость, балл	0 ГОСТ 9.050-75)
Радиационная стойкость, МГр, не менее	1 (ГОСТ 9.706-81, метод 1)
Коэффициент дезактивации для радионуклида ^{137}Cs, не менее	100 (ГОСТ Р 53371-2009)
Угол смачивания, градус	113—116 (гониометрический метод)
Адгезия, МПа, не менее, балл, и не более	8 (ГОСТ 27890-88) 2 (ГОСТ 15140-78)
Твердость по маятниковому прибору типа ТМЛ (маятник А), отн. ед., не менее	0,6 (ГОСТ 5233-89)
Прочность при ударе (прибор типа У-1А, диаметр бойка 8 мм), см, не менее	50 (ГОСТ 4765-73)
Эластичность пленки при изгибе, мм, не более	2 (ГОСТ 6806-73)
Стойкость к действию дезактивирующих рецептур при температуре (65 ± 5) °С, ч, не менее	72 (ГОСТ 9.403-80, метод В)
Стойкость к статическому действию 3 %-го раствора NaCl при температуре (23 ± 2) °С, ч, не менее	720 (ГОСТ 9.403-80, метод А)

Таблица 2. Свойства полимерного композита для покрытия стальных конструкций

Тестируемые показатели		Метод испытаний	Значение
Показатель текучести расплава (2,16 кг, 190 °С), г/10 мин		ГОСТ 11645-73	5—6
Содержание летучих компонентов, не более, %		ГОСТ 26359-84	0,5
Остаток на сите 0,315 мм (50 меш), не более, %		Ситовый анализ	5
Прочность при растяжении, не менее, МПа		ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012)	12
Относительное удлинение при разрыве, не менее, %			100
Адгезия	н/см, не менее	ГОСТ 9.602 -2016	70
	баллы, не более	ГОСТ 32702.2-2014	1
Сопротивление коррозии (7 дней/10 % HCl/ 10 % NaCl/1 % NaOH), не менее, % *		ГОСТ 12020-2018	95
Стойкость к УФ-лучам (500 ч), не менее, % *		ГОСТ 9.401-2018	95
Стойкость в нейтральном соляном тумане, не менее, часы		ГОСТ 34388-2018 (ISO 9227:2012)	1000
Диэлектрическая сплошность, не менее, кВ/мм		ГОСТ 9.602-2016	10
Стойкость к растрескиванию, не менее, часы		ГОСТ 13518-68	500
Температура плавления, не менее, °С		ГОСТ 33454-2015	125
Термоциклирование от – 60 до + 20 °С, не менее, циклы		ГОСТ 9.602-2016	10

* Показатель сопротивления химической коррозии и стойкости к УФ-излучению обозначает процент сохранения у материала значений прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве.

Основные свойства полимерного композита для покрытия стальных конструкций приведены в табл. 2.

Полимерные композиты выпускаются ООО «МеталлПластПриорити» (г. Магнитогорск), входящим в холдинг АО «УралЭнергоРесурс», в объеме до 300 т/мес., с различными добавками в соответствии с решаемыми задачами (антикоррозийное покрытие армировки стволов, поверхностей бетонных и металлических конструкций, анкерной крепи, электроизоляция площадок в цехах и др.). Стоимость покрытия 1 м^2 бетонной поверхности составляет 1,0—3,0 тыс. руб. в зависимости от толщины наносимого слоя и места расположения объекта.

Достоинства полимерных композитов:

- разработаны для нанесения защитных моно- и многослойных покрытий на поверхности бетонных и стальных конструкций, обеспечивают изоляцию при контакте с водой, водными растворами кислот, щелочей, солей, ПАВ и биологических соединений; имеют высокую степень электрической изоляции;
- композит для нанесения антикоррозионных покрытий стальных конструкций соответствует требованиям ГОСТ 9.602, ГОСТ 55436 по адгезии к стали, прочности и удлинению при разрыве, стойкости к температурным перепадам, диэлектрической сплошности;
- покрытие для увеличения срока службы имеет устойчивые адгезионные связи с бетонными и стальными конструкциями, эксплуатируется в условиях от – 60 до + 60 °С, обладает стойкостью к истиранию, растрескиванию, сколам, эластичность на изгиб — до 700 %, растяжение — до 150 %; не гигроскопично;
- сохраняет цвета под действием ультрафиолетового излучения (УФ), выгорание 1 % за 20 лет;
- имеет нейтральный pH, высокую стойкость к образованию биопоражений и обрастаний, не реагирует на изменения pH воды, экологичен.

Таблица 3. Сравнительные эксплуатационные характеристики полимерных покрытий

Показатели / Покрытие	Полиуретановое	Эпоксидное	Полиолефиновое (ПЭ, ПП)
Химическая стойкость	Снижена стойкость к щелочам, не стойки в органических растворителях	Высокая стойкость общекислотная, углекислотная, сульфатно-хлоридная, щелочная, нефтехимическая, электрохимическая, водо(паро)непроницаемость	
Температура эксплуатации	–(50...30)...+(80...120) °С	–60...+(60...100) °С	–(60...30)...+(60...80) °С
Возгораемость	Горят при контакте с открытым пламенем		
Дымообразование	Высокое	Высокое, с копотью	Низкое
Токсичные продукты окисления/горения	Угарный газ, цианистый водород, пары изоцината	Угарный газ, эфирные, фенольные,аминные соединения	Угарный газ. Возможны формальдегид, ацетальдегид
Трещиностойкость к удару	Высокая	Хорошая	Высокая (ПЭ), хорошая (ПП)
Температура ухудшения электросопротивления	⩾40 °С	Данные отсутствуют	>80 °С
Скорость эрозии при воздействии ВЧ-травления	Скорость эрозии/окислительно деструкции увеличивается в ряду ПЭ<ПП<ЭП<ПУ		
Время от нанесения до начала эксплуатации	24 часа	Не менее 48 часов	24 часа

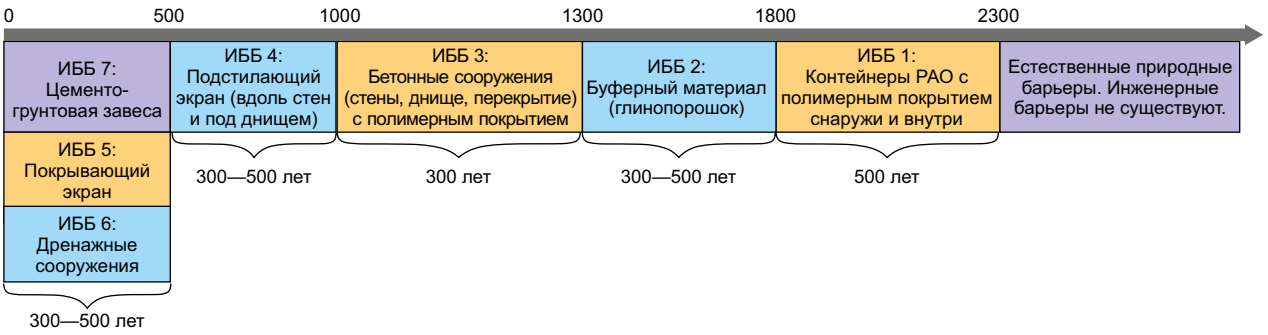

Рис. 8. Диаграмма последовательного вступления «в работу» инженерных барьеров безопасности при использовании полимерных композитов в ИББ 1 (изоляция при внешних и внутренних воздействиях) и ИББ 3 (изоляция с двух сторон от воздействия подземных вод)

В табл. 3 приведены сравнительные эксплуатационные характеристики отечественных полиуретановых (ППУ 328, ППУ 329), эпоксидных и полиолефиновых полимерных покрытий.

На рис. 8 приведена диаграмма последовательной «работы» инженерных барьеров безопасности (ИББ) модульных сооружений ППЗРО (сценарий нормального развития: эволюционное протекание природных процессов и естественная деградация ИББ, приводящая к постепенному снижению их прочностных и изолирующих свойств) [4], [19]. При нанесении полимерного покрытия с двух сторон на стены, днище и верхнее перекрытие время изолированного состояния бетонных сооружений (ИББ 3) до начала разрушения увеличивается со 100 до 300 лет (с одной из сторон).

Полимерное покрытие внешней и внутренней поверхностей бетонных контейнеров РАО типа НЗК-150-1,5П (ИББ 1) позволит увеличить время их надежной изоляции с 300 до 500 лет (начало разрушения с одной из сторон). Суммарное время изоляции барьеров безопасности модульных сооружений ППЗРО при эволюционном протекании природных процессов увеличится с 1900 до 2 300 лет.

Заключение

Для долговременной изоляции долгоживущих радионуклидов с периодом полураспада, превышающим тысячи лет, в модульных сооружениях ППЗРО требуется дополнительная защита от внутреннего разрушения и внешнего воздействия. Требования к материалам защиты следующие: химическая стойкость, гидроизоляция, высокая адгезия к бетону и металлам, технологичные способы нанесения. Этим параметрам в наибольшей степени отвечают полиэтилен и полипропилен, они самые промышленно доступные и универсальные, отличаются химической инертностью, водостойкостью и невысокой стоимостью.

Разработаны полимерные композиты для нанесения защитных антикоррозионных моно- и многослойных покрытий на поверхности бетонных и стальных конструкций, контактирующих с водой, водными растворами кислот, щелочей, солей, ПАВ и биологических соединений. Они устойчивы к резким сменам влаго-температурных условий, имеют высокую степень электрической изоляции.

Полиэтиленовая основа составляет 80—90% массы покрытия; функциональные добавки — 10—20% (пигменты, стабилизаторы, наполнители, компатибилизаторы и др.). Технология приготовления изолирующего покрытия заключается в смешивании полимера методом экструзии с функциональными добавками при высокой температуре и получении гранул сложного состава, которые измельчаются до состояния порошка с размером частиц 140—315 микрон, который затем методом пневматического газопламенного напыления наносится на поверхности бетона или металла в один или несколько слоев с расплавлением, толщина покрытия 1—5 мм.

Надежная гидроизоляция, хорошая адгезия с бетоном, металлами, несложная технология нанесения являются важными достоинствами композитов для использования их с целью увеличения сроков изоляции модульных сооружений ППЗРО: поверхностей стен, перекрытий и днища, бетонных и металлических контейнеров с РАО. Для установления параметров изолирующей способности композитов в геологически значимые периоды времени необходимо проведение дополнительных исследований.

Литература

1. *Старостина И. А.* Кислотно-основные взаимодействия полимеров и металлов в адгезионных соединениях : дисс. … докт. хим. наук. — Казань, 2011. 315 с.
2. *Стоянов О. В., Старостина И. А.* Развитие методов оценки поверхностных кислотно-основных свойств полимерных материалов // Вестник технологического университета. 2010. №4. С. 58—68.
3. *Стоянов О. В., Старостина И. А.* Про адгезию полимеров : Лекция. — URL: https://www.youtube.com/watch?v=JG1rxnr1yhA&t=39s (дата обращения 24. 09. 2022).
4. *Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В.* Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации//Радиоактивные отходы. 2022. №3(20). С. 50—60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.
5. *Мельникова М. А.* Полимерные материалы: свойства, практическое применение : Учебное пособие. — Благовещенск, Амурский гос. ун-т, 2013. 86 с.
6. *Герасимова Н. С.* Полимерные и композиционные материалы : Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение». — Калуга, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 45 с.
7. Порошковые краски. Технология покрытий / Пер. с англ. Под ред. проф. А. Д. Яковлева. — Санкт-Петербург : ЗАО «Промкомплект», Химиздат, 2001. 256 с.
8. *Козлов Н. А. Митрофанов А. Д.* Физика полимеров. — Владимир, Владим. гос. ун-т, 2001. 345 с.
9. СП 28.13330.2017. Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (утв. Приказом Минстроя России от 27.02.2017 № 127/пр) (ред. от 28.12.2021).
10. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
11. Пожарная опасность строительных материалов / Под ред. А. Н. Баратова. — М. : Стройиздат, 1988. 380 с.
12. ГОСТ 16338-85. Полиэтилен низкого давления. Технические условия.
13. *Крыжановский В. К. и др.* Технические свойства полимерных материалов: Справ. пособие. — СПб. : Профессия, 2003. 240 с.
14. Сколько времени занимает разложение отходов. How Long Does It Take Garbage to Decompose? — URL: https://keepcasscountybeautiful.com/images/PDF/Recycling/how_long_does_it_take_garbage_to_decompose.pdf (дата обращения 11.08.2022).
15. *Бабич Л. Н., Бородин Ю. В.* Перспективные полимерные материалы, используемые для радиационной защиты. — Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2012.
16. *Штейнберг Е. М., Зенитова Е. А.* Снижение экологической опасности радиационного облучения с использованием полимерных композиционных материалов. Обзор // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Том 15. №8. С. 67—71.
17. Эмаль для атмосферостойкого радиационно стойкого дезактивируемого противообрастающего грибостойкого покрытия : пат. RU №2703636 Российская Федерация / Лысов А. А., Мещеряков Ю. Я., Карпов В. А., Ковальчук Ю. Л.; патентообладатель АО «НИКИМТ-Атомстрой», ООО «ВНИИЭИМ». — № 2018145844 ; заявл. 24.12.2018 ; опубл. : 21.10.2019 Бюл. № 30.
18. ФГУП «НО РАО». Аналитическое исследование изменения свойств материалов инженерных

барьеров безопасности в условиях приповерхностного захоронения РАО : Итоговый отчет. — Санкт-Петербург, АО «РАОПРОЕКТ», 2017. С.79.

19. НП-93-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.

Информация об авторах

Игин Игорь Михайлович, генеральный директор, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: IMIgin@norao.ru.

Минин Андрей Васильевич, заместитель генерального директора, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: AVMinin@norao.ru.

Кузьмин Евгений Викторович, профессор, доктор технических наук, главный специалист, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: EVKuzmin@ norao.ru.

Бамборин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Зубков Антон Анатольевич, доктор технических наук, генеральный директор, ООО «УралЭнергоРесурс» (455044, Челябинская обл., Магнитогорск, пр-кт Металлургов, д. 12), e-mail: zubkov_aa@uer74.ru.

Трофимова Юлия Васильевна, эксперт, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: YVTrofimova@norao.ru.

Библиографическое описание статьи

Игин И. М., Минин А. В., Кузьмин Е. В., Бамборин М. Ю., Зубков А. А., Трофимова Ю. В. Возможности изоляции модульных сооружений ППЗРО термопластичными полимерами // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 28—37. DOI: 10 25283/2587-9707-2023-1-28-37.

OPPORTUNITIES FOR MODULAR NSDF STRUCTURE INSULATION BY THERMOPLASTIC POLYMERS

Igin I. M.[1], Minin A. V.[1], Kuzmin E. V.[1], Bamborin M. Yu.[1], Zubkov A. A.[2], Trofimova Iu. V.[1]

[1]National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia

[2]UralEnergoResurs LLC, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia

Article received on January 12, 2023

High-molecular compounds have been studied, as well as their relationship with other materials and modifications made based on various additives introduced. Their findings helped to initiate the development of technologies providing control over the adsorption process at the phase boundary and polymerization under thermal conditions. The paper discusses a method developed involving thermoplastic polymer of the polyolefin (polyethylene) class applied to concrete and metal surfaces. This material has high adhesive capacity, is resistant to abrasion, corrosion

and other destructive factors. Thanks to its improved characteristics this polymer can be considered as an additional waterproofing material in the designs of engineered safety barriers for radioactive waste Class 3 and 4 disposal in near-surface disposal facilities (NSDF).

Keywords: *radioactive waste, radioactive waste disposal facility, polyethylene, conditioning agent, adhesion to steel, adhesion to concrete, chemical inertness, polymer coating, flame spraying, coating quality control.*

References

1. Starostina I. A. *Kislotno-osnovnyye vzaimodeystviya polimerov i metallov v adgezionnykh soyedineniyakh* [Acid-base interactions of polymers and metals in adhesive compounds]. Dr. chem. sci. diss. Kazan, 2011. 315 p.

2. Stoyanov O. V., Starostina I. A. Razvitiye metodov otsenki poverkhnostnykh kislotno-osnovnykh svoystv polimernykh materialov [Development of assessment methods for the surface acid-base properties of polymeric materials]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Technological University,* 2010, no. 4, pp. 58—68.

3. Stoyanov O. V., Starostina I. A. *Pro adgeziyu polimerov* [About polymer adhesion]. Lecture. — URL: https://www.youtube.com/watch?v=JG1rxnr1yhA&t=39s (accessed on 24.09. 2022).

4. Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuzmin E. V., Trofimova Iu. V. Opredelenie prognoznykh srokov dolgovremennoi bezopasnosti punktov pripoverkhnostnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov pri razlichnykh stsenariyakh ikh ehkspluatatsii [Forecasted timeframes for the longterm safety of near-surface disposal facilities for radioactive waste calculated considering various scenarios of their operation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 3 (20), pp. 50—60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

5. Melnikova M. A. *Polimernyye materialy: svoystva, prakticheskoye primeneniye* [Polymeric materials: properties, practical application]. Blagoveshchensk, Amur State University Publ., 2013. 86 p.

6. Gerasimova N. S. *Polimernyye i kompozitsionnyye materialy. Uchebnoe posobie po distsipline "Materialovedenie"* [Polymer and composite materials. Textbook on the discipline "Materials Science"]. Kaluga, KF MSTU named after N. E. Bauman Publ., 2019. 45 p.

7. *Poroshkovyye kraski. Tekhnologiya pokrytiy* [Powder paints. Coating technology]. Translated from English, edt. by prof. A. D. Yakovlev. Saint-Petersburg, CJSC Promkomplekt, Himizdat Publ., 2001. 256 p.

8. Kozlov N. A. Mitrofanov A. D. *Fizika polimerov* [Physics of polymers]. Vladimir, Vladimir State University Publ., 2001. 345 p.

9. SP 28.13330.2017. *Svod pravil. Zashchita stroitel'nykh konstruktsiy ot korrozii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.11-85* [Code of rules. Protection of building structures against corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11-85]. Approved by the Order of the Ministry of Construction of Russia dated 27.02.2017 No. 127/pr. (ed. dated 28.12.2021).

10. GOST 9.602-2016. *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii* [Unified system providing protection against corrosion and aging. Underground structures. General requirements for corrosion protection].

11. *Pozharnaya opasnost' stroitel'nykh materialov* [Fire hazard of building materials]. Edt. by A. N. Baratov. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 380 p.

12. GOST 16338-85. *Polietilen nizkogo davleniya. Tekhnicheskiye usloviya* [Low-pressure polyethylene. Specifications].

13. Kryzhanovsky V. K. et al. *Tekhnicheskiye svoystva polimernykh materialov: Sprav. pos.* [Technical properties of polymeric materials: technical manual]. Saint- Petersburg, Publishing House Professiya Publ., 2003. 240 p.

14. How Long Does It Take Garbage to Decompose? — URL: https://keepcasscountybeautiful.com/images/PDF/Recycling/how_long_does_it_take_garbage_to_decompose.pdf (accessed on 11.08.2022).

15. Babich L. N., Borodin Yu. V. *Perspektivnyye polimernyye materialy, ispol'zuyemyye dlya radiatsionnoy zashchity* [Promising polymeric materials applied for radiation protection purposes]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2012.

16. Shteynberg Ye. M., Zenitova Ye. A. Snizheniye ekologicheskoy opasnosti radiatsionnogo oblucheniya s ispol'zovaniyem polimernykh kompozitsionnykh materialov. Obzor [Reducing the environmental hazard of radiation exposure using polymer composite materials. Overview]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Technological University,* 2012, vol. 15, no. 8, pp. 67—71.

17. *Emal' dlya atmosferostoykogo radiatsionno-stoykogo dezaktiviruyemogo protivoobrastayushchego gribostoykogo pokrytiya* [Enamel for a weather-resistant radiation-resistant deactivating anti-fouling fungus-resistant coating]. Pat. RU No. 2703636 Russian Federation. Lysov A. A., Meshcheryakov Yu. Ya., Karpov V. A., Koval'chuk Yu. L. Patentee JSC "NIKIMT-Atomstroy", LLC "VNIIEIM", no. 2018145844 ; application date 24.12.2018 ; publication date 21.10.2019. Bul. No. 30.

18. FSUE NO RAO. *Analiticheskoye issledovaniye izmeneniya svoystv materialov inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti v usloviyakh pripoverkhnostnogo zakhoroneniya*

RAO. Itogovyy otchet [Analytical study on changing material properties of engineered safety barriers under near-surface radioactive waste disposal conditions. Final report]. Saint-Petersburg, JSC RAO-PROYEKT Publ., 2017. P. 79.

19. NP-93-14. *Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii. Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Radioactive Waste Acceptance Criteria for Disposal].

Information about the authors

Igin Igor Mikhailovich, General Director, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: IMIgin@norao.ru.

Minin Andrey Vasilievich, Deputy General Director for Licensing and Permitting Activities, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AVMinin@norao.ru.

Kuzmin Evgeny Viktorovich, Doctor of Science, professor, Chief Specialist, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVKuzmin@ norao.ru.

Bamborin Mikhail Yurievich, PhD, Director of the Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Zubkov Anton Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, General Director of UralEnergoResurs LLC (12, Metallurgov Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455044, Russia), e-mail: zubkov_aa@uer74.ru.

Trofimova Iuliia Vasilievna, expert, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: YVTrofimova@norao.ru.

Bibliographic description

Igin I. M., Minin A. V., Kuzmin E. V., Bamborin M. Yu., Zubkov A. A., Trofimova Iu. V. Opportunities for modular NSDF structure insulation by thermoplastic polymers. *Radioactive Waste,* 2023, no. 1 (22), pp. 28—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-28-37. (In Russian).