

СВОЙСТВА БИТУМНЫХ КОМПАУНДОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ЗАХОРОНЕНИЮ

А. С. Баринов, Н. И. Дробышевский

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 30 января 2019 г.

В статье проведен анализ результатов исследования свойств битумированных радиоактивных отходов, в том числе и по результатам многолетних испытаний в условиях, имитирующих приповерхностное захоронение. Проведена оценка соответствия их показателей требованиям, предъявляемым федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии при их захоронении.

Ключевые слова: атомные станции, жидкие радиоактивные отходы, битумирование, битумный компаунд, захоронение битумного компаунда.

В настоящее время довольно активно обсуждается вопрос о возможности и требованиях к безопасному захоронению битумных компаундов — продуктов переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) методом битумирования. Основной причиной этих обсуждений является пожаро-, а при определенных условиях и потенциальная взрывоопасность этого продукта.

Процесс битумирования ЖРО был разработан в 60-х годах прошлого века и применялся во многих странах: Франции, Бельгии, Германии, СССР, Великобритании, Японии и др. Он состоит в упаривании ЖРО и последующем смешении образовавшихся солей с расплавленным битумом. Образующийся при этом продукт (битумный компаунд) в текучем состоянии выгружается в формообразующую упаковку или по обогреваемому битумопроводу передается в специальные хранилища.

Первая промышленная установка периодического действия была создана в Моле (Бельгия) в 1964 г. [1].

Причинами достаточно широкого применения этой технологии являлось следующее:

- простота аппаратного оформления и реализации процесса;

- высокая универсальность, возможность переработки гетерогенных ЖРО (с высоким содержанием взвесей, ионообменных смол и фильтроперлита) различного химического состава и минерализации;

- сокращение более чем в 2 раза объема продуктов переработки по сравнению с ранее разработанным методом цементирования;

- высокая водостойчивость битумного компаунда.

Исследования метода битумирования для переработки жидких радиоактивных отходов в СССР были начаты в 70-х годах прошлого столетия. Научное обеспечение при создании технологии битумирования осуществлял Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара (ВНИИНМ им. академика А. А. Бочвара). Впервые в опытно-промышленном масштабе процесс битумирования применялся в СССР на Центральной станции радиационной безопасности г. Москвы (ЦСРБ, в последующем МосНПО «Радон»). На этом предприятии были созданы и в различные годы эксплуатировались три типа установок битумирования: БО-75 (котлового типа), 1970 г.; УБД-200 (двухстадийного битумирования с экструдерным смесителем), 1974 г.,

УРБ-8 (установка на базе роторного пленочного испарителя), 1976 г. Переработке подвергались кубовые остатки, образовавшиеся после упаривания ЖРО на Московской станции очистки. Первая промышленная установка битумирования была введена в опытную эксплуатацию на Ленинградской АЭС в 1984 г., затем этот процесс был внедрен на Калининской АЭС.

Основные результаты исследования свойств битумных компаундов

Разработке и внедрению процесса битумирования в практику переработки ЖРО на АЭС предшествовал достаточно длительный процесс научных исследований, который включал выбор битума, наиболее пригодного для данного процесса, определение технологических параметров процесса, исследование взаимодействия битума и компонентов ЖРО, изучение свойств битумного компаунда, в том числе и при их долговременном хранении в условиях имитирующих захоронение. Проводились исследования по изучению взрыво- и пожароопасности компаундов.

Битум представляет собой смесь различных углеводородов, получаемую при окислении остаточного продукта нефтеперегонки — гудрона — атмосферным воздухом. В его составе, как правило, выделяются три основные фракции: масла, смолы и асфальтены. Соотношение этих фракций в основном определяет свойства битумов [2].

В результате проведенных исследований в качестве матричного материала для битумирования ЖРО на промышленных установках были выбраны сорта «дорожных» битумов БНД 60/90 и БНД 40/60 [3].

При исследовании битумных компаундов изучались основные свойства, характеризующие их при оценке долговременной безопасности при захоронении.

- водостойкость (скорость выщелачивания компонентов ЖРО);
- пожаро- и взрывобезопасность;
- радиационная стойкость;
- микробиологическая стойкость.

Водостойкость битумных компаундов

Основным показателем, характеризующим способность того или иного матричного материала удерживать компоненты включенных в них ЖРО, является скорость выщелачивания [4].

При исследовании свойств битумных компаундов были получены следующие зависимости их водостойкости [3, 5]:

- скорость выщелачивания радионуклидов и макрокомпонентов ЖРО, включенных в компаунд, составляет величину 10^{-4} – 10^{-5} г/см²·сут;
- скорость выщелачивания компонента зависит от формы его соединения в солях ЖРО.

Выщелачивания водорастворимых соединений выше, чем нерастворимых;

- скорость выщелачивания зависит от состава битума, используемого при переработке ЖРО. Компаунды, приготовленные на основе битумов с большим содержанием асфальтенов («жесткие» битумы), характеризуются более высокой скоростью выщелачивания;
- скорость выщелачивания зависит от соотношения солей и битума в битумном компаунде (соленополнения). С увеличением содержания в нем солей скорость выщелачивания увеличивается, причем при соленополнении более 50–55 %, в зависимости от марки битума, она резко возрастает. Исходя из этих результатов, степень наполнения компаундов для промышленных установок битумирования была установлена в 40 %.

Пожаро- и взрывобезопасности битумных компаундов

Понятно, что потенциальная пожаро- и взрывоопасность является основной причиной озабоченности при рассмотрении вариантов захоронения битумных компаундов. Рассмотрим с точки зрения пожароопасности свойства основных компонентов битумных компаундов, получающихся при битумировании ЖРО.

Битум: относится к горючим веществам и обладает следующими показателями термической стойкости [6]:

- температура вспышки в открытом тигле — 240–299 °С;
- температура вспышки в закрытом тигле — 212–270 °С;
- температура воспламенения — 300–351 °С;
- температура самовоспламенения — 380–397 °С.

Нитрат натрия: негорючий, является окислителем и способствует самовозгоранию горючих веществ, относится к категории пожароопасных [6]. Обладает следующими свойствами:

- температура плавления — 308 °С;
- температура разложения — 380 °С.

При разложении нитрата натрия выделяется кислород, который способен поддерживать горение горючих веществ даже в инертной атмосфере.

При изучении пожароопасности битумных компаундов с нитратом натрия, имитирующим состав отходов АЭС с реактором РБМК, установлено, что их температура вспышки и температура воспламенения несколько снижаются по сравнению с чистым битумом и составляют, соответственно, 228–231 и 280–290 °С. Для компаундов, наполненных сухими солями, имитирующими отходы ЖРО АЭС с реактором ВВЭР, температура воспламенения снижается до 250 °С [7]. В табл. 1 приведены результаты определения термической стойкости битумных компаундов, приготовленных на основе битума марки БНК-2 [8].

Таблица 1. Термическая стойкость битумных компаундов [8]

Наполнитель	Соотношение битума и наполнителя, мас. %	Температура, °С		
		вспышки	воспламенения	самовоспламенения
Нитрат натрия	40/60	279	354	506
	60/40	293	356	548
Смесь, имитирующая отходы АЭС	40/60	293	346	532
	60/40	305	356	538
БНК-2	-	293	345	-

Исследования распространения горения компаундов с имитаторами ЖРО АЭС с реактором РБМК показали, что оно происходит при содержании солей более 62 мас.%. Экспериментами по оценке возможности горения битумного компаунда в атмосфере азота установлено, что при содержании солей более 65%, после воспламенения образцов высокотемпературным источником, они полностью сгорали, при этом скорость горения составила 0,11 кг/с·м² [7].

Эксперименты по изучению способности битумного компаунда к взрыву проводились с битумными компаундами, приготовленными на основе битумов марок БНК 45/180 и БНД 60/90 и соли нитрата натрия, имитирующей ЖРО АЭС с реактором РБМК. Было установлено, что нижний предел детонационной способности составляет 6–7 мас. % содержания битума в компаунде. Компаунды сохраняют способность к детонации при содержании в нем битума до 15 мас.%. [8] При этом отмечено влияние структуры битумного компаунда на его детонационную способность. При комковатом сложении он сохраняет способность к детонации при содержании битума до 25–30%. Нагретые до жидкого состояния смеси не детонируют и сохраняют это свойство и при застывании расплавленного битума [3, 9]. При этом отмечено, что оптимальными условиями для возбуждения детонации слабодетонирующих смесей является большая масса смеси, прочная оболочка и мощный инициатор [8].

Радиационная стойкость битумных компаундов

По проведенным оценкам, для типичных отходов АЭС доза облучения до распада входящих в них радионуклидов не превысит 10⁵ Гр и не вызовет изменения свойств битумных компаундов [3].

Микробиологическая стойкость

По результатам натурных испытаний в течение полутора лет образцов битумных компаундов, приготовленных на основе битумов БНК-2, БН-5 с 50% наполнением солями ЖРО АЭС с реактором РБМК, установлено, что наибольшее развитие грибов наблюдается на участках, которые загрязнены грунтом и на которые попадает

влага. На основании этого авторами делается вывод о необходимости исключения попадания на захораниваемые материалы грунта и влаги. В результате проведенных исследований установлено, что битумный компаунд, полученный при битумировании ЖРО АЭС, биоустойчив, что объясняется высокой щелочностью ЖРО [10].

Поведение битумных компаундов при длительном хранении

Исследования по изучению поведения битумных компаундов проводились на протяжении 15–20 лет как в лабораторных условиях, так и в условиях имитирующих реальное захоронение [1, 11]. В процессе этих исследований изучалось:

- выщелачивание радионуклидов и макрокомпонентов ЖРО, включенных в компаунд, в условиях длительного хранения;
- изменение фракционного состава битумов;
- распределение радионуклидов между битумом и включенными в него солями ЖРО.

Выщелачивание радионуклидов и макрокомпонентов

Длительные наблюдения за поведением битумных компаундов в условиях, имитирующих реальное захоронение в грунтовой траншее, проводились в ГУП МосНПО «Радон». Эксперименты продолжались более 15 лет. Результаты работ свидетельствуют о сохранении водоустойчивости битумных компаундов и диффузионном характере выноса из них компонентов ЖРО.

Изменение фракционного состава битумов

Исследования показали изменения фракционного состава битума в процессе его хранения. Эти изменения связаны с увеличением в нем доли асфальтеновой фракции. Максимальное изменение наблюдалось в частях блоков компаунда, непосредственно контактирующих с грунтом. После 14 лет хранения доля асфальтенов увеличилась приблизительно на 4%.

Распределение радионуклидов

Различными исследованиями показано, что в процессе получения и хранения битумного компаунда происходит взаимодействие между компонентами битума и веществами, входящими в состав ЖРО. Наиболее активно эти взаимодействия происходят на этапе битумирования ЖРО в условиях присутствия высококонцентрированных растворов и повышенной температуры. В условиях лабораторного хранения под водой активность составляющих битумного компаунда (битум и солевой наполнитель) практически одинакова, причем основная доля активности, более 90%, содержится в асфальтеновой

фракции. Спектральный анализ асфальтенов показал наличие в них около 1,6% натрия, при том что в асфальтенах, выделенных из исходного битума, натрия не обнаружено.

На основании выполненных работ следует отметить, что при длительном хранении битумных компаундов в них протекают реакции, приводящие к изменению их фракционного состава и перераспределению компонентов ЖРО между битумом и солевым наполнителем. Наличие натрия в составе асфальтенов может свидетельствовать о протекании процессов денитрации. При протекании этих процессов возможно изменение сложения компаундов и увеличение его влажности. При хранении больших по высоте слоев компаунда не следует исключать и оседание солевых частиц, что может привести к увеличению его соленаполнения в нижележащих слоях компаунда. Представляется необходимым провести специальные исследования компаундов, хранящихся на АЭС, с целью изучения динамики протекания этих процессов.

Современное состояние в области хранения и требования к захоронению битумных компаундов

Количество накопленных к настоящему времени битумированных РАО составляет более 26 000 м³. Основное их количество находится на ЛАЭС (около 25 000 м³) и Калининской АЭС (чуть более 1 000 м³), на которых, согласно проекту, для хранения битумного компаунда используются наливные хранилища. Хранилища представляют собой бетонные сооружения, состоящие из отсеков для размещения битумного компаунда, который поступал в них по обогреваемому компаундопроводу [5]. Проведенными исследованиями установлено, что для сохранения необходимой текучести и исключения расслаивания компаунда при перекачке по компаундопроводу, его температура должна составлять 100–200 °С. При этом, как отмечается авторами, такая температура обеспечивает его растекание на 8–9 м и его расслаивание не наблюдается.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии допускают захоронение битумных компаундов [12, 13], при этом устанавливается ряд требований:

- отнесение компаундов к классу отходов в соответствии с критериями, установленными для удаляемых отходов;
- соответствие характеристик битумных компаундов требованиям норм;
- разработка специальных проектных решений для систем захоронения битумных компаундов.

Одним из основных вопросов является отнесение битумных компаундов, полученных при отверждении кубовых остатков ЖРО АЭС, к тому или иному классу удаляемых радиоактивных

отходов, который определяется в зависимости от наличия долго- и короткоживущих радионуклидов и их удельной активности в отходах, предназначенных для захоронения. Исходя из состава перерабатываемых ЖРО, основными радионуклидами, определяющими их радиологическую опасность, будут являться: ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ⁵⁴Mn, ⁵¹Cr, ⁵⁵Fe, ⁵⁹Fe. Все указанные радионуклиды, кроме ⁶³Ni, относятся к категории короткоживущих. В материалах инвентаризации радиоактивных отходов указывается, что в битумных компаундах, полученных при переработке кубовых остатков ЖРО ЛАЭС, присутствуют только ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co, удельные активности этих радионуклидов составляют, соответственно, $1,37 \cdot 10^4$ и $2,27 \cdot 10^1$ Бк/г, а в битумных компаундах Калининской АЭС — ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, удельная активность которых составляет, соответственно, $1,02 \cdot 10^4$, $2,2 \cdot 10^3$, $3,9 \cdot 10^2$ и $7,0 \cdot 10^1$ Бк/г. Следует отметить, что наличие в битумном компаунде долгоживущего ⁶³Ni, вероятнее всего, не определялось в связи с его трудной детектируемостью, и, кроме того, вряд ли следует ожидать его удельной активности в битумированных ЖРО более $1 \cdot 10^5$ Бк/г (предел отнесения материалов, содержащих данный радионуклид к категории радиоактивных отходов [14]). Таким образом, битумные компаунды, полученные в результате переработки кубовых остатков ЖРО, образующихся на АЭС, могут быть отнесены к 3 классу удаляемых РАО, которые подлежат захоронению в пунктах приповерхностного захоронения [14].

В соответствии с классификацией веществ по пожароопасности битумный компаунд относится к категории «горючих» [15] и допустим для захоронения при использовании упаковочного комплекта (контейнера), огнестойкость которого устанавливается в проекте ПЗРО [13]. Таким образом, захоронение битумных компаундов возможно в случае, если это предусмотрено проектом ПЗРО, включающим, в частности, специальные требования к огнестойкости упаковок (контейнеров), в которых оно осуществляется.

Кроме того, федеральными нормами установлены основные показатели качества битумного компаунда, характеризующие его радиационные показатели, водоустойчивость, содержание влаги, термическую и радиационную стойкость (табл. 2) [12].

При оценке соответствия битумных компаундов, хранящихся на АЭС, установленным показателям качества озабоченность вызывает их соответствие показателям содержания свободной влаги. Кроме того, учитывая условия обеспечения взрывобезопасности компаундов, которые приведены ранее, следует предусмотреть его переплавку на стадии кондиционирования, что позволит привести в том числе и его влажность в соответствие с установленными показателями.

Таблица 2. Основные показатели качества
битумного компаунда [12]

Показатель качества	Допустимые значения
Удельная активность компаунда: бета-активность; альфа-активность	не более 10^{10} Бк/кг не более 10^6 Бк/кг
Водоустойчивость (скорость выщелачивания радионуклидов по ^{137}Cs и ^{90}Sr)	менее $1 \cdot 10^{-4}$ г/см ² ·сут
Содержание свободной влаги в компаунде	менее 3% с ионообменными смолами менее 1% с соевым раствором
Термическая стойкость	Т вспышки более 200 °С Т воспламенения более 250 °С Т самовоспламенения более 400 °С
Радиационная стойкость	увеличение объема менее 10% после облучения дозой 10^6 Гр

Размещение битумных компаундов в наливных хранилищах большого объема создали определенные сложности по их кондиционированию и последующему захоронению. Процесс извлечения битумных компаундов из наливных хранилищ в настоящее время находится на стадии разработки предложений и проведения исследований. Рассматриваются следующие основные способы:

- разогрев и раскочка разогретого битума;
- глубокое охлаждение компаунда в отсеке хранилища с последующим его механическим разрушением и извлечением кусков.

Кроме того, исследуется возможность растворения битумной матрицы компаунда в органических растворителях с последующей раздельной переработкой органической и неорганической составляющих. Применимость данного способа представляется маловероятной вследствие его сложности и значительной трудоемкости.

Методы разогрева битума и его перекачки в жидком виде широко применяются в различных отраслях промышленности, хорошо проработаны и имеют для этих целей промышленно выпускаемое оборудование. Кроме того, при битумировании ЖРО на АЭС применялся именно такой метод перекачки компаунда и, следовательно, имеется опыт выполнения подобных работ. В общепромышленных целях для разогрева битума наиболее широко применяются системы парового и электрического разогрева, кроме того, используются системы с газовым обогревом, применением инфракрасного излучения или высокочастотного разогрева. Учитывая повышенные требования к пожаробезопасности процессов обращения с РАО, на наш взгляд, наиболее предпочтительным является разогрев с применением пара.

В целом изъятие битумного компаунда из хранилища и его кондиционирование должно состоять из двух этапов. На первом этапе производится локальный разогрев участка хранилища и перекачка компаунда по обогреваемому

битумопроводу в промежуточную емкость (битумоплавильный котел). На втором — битумный компаунд дополнительно разогревается в битумоплавильном котле, перемешивается и доводится до установленных показателей свойств по содержанию влаги, а затем перекачивается в формообразующую первичную упаковку.

В соответствии с нормами по обеспечению безопасности при перевозке радиоактивных материалов, для битумного компаунда требуется использование транспортной упаковки типа А [16]. Одним из вариантов такой упаковки может быть невозвратный защитный контейнер НЗК-150-1,5П. Этот контейнер может одновременно служить в качестве транспортной упаковки и упаковки для захоронения.

Кондиционирование битумного компаунда может осуществляться следующим образом: битумный компаунд в расплавленном состоянии разливается в формообразующую упаковку, например тонкостенные металлические бочки объемом 200 л. Четыре бочки, заполненные битумным компаундом, размещаются в контейнере НЗК-150-1,5П, промежутки между ними заполняются буферным материалом на основе глинистой смеси. Разлив компаунда непосредственно в контейнер представляется нецелесообразным в связи с его значительной массой и длительным временем остывания компаунда. На контейнер устанавливается и герметизируется крышка (рис. 1).

Расчет распределения температуры в отсеке ПЗРО при аварийном возгорании битумного компаунда

Для оценки безопасности при аварийном возгорании контейнера с битумным компаундом был выполнен расчет температур в отсеке ПЗРО.

Расчет проводился для следующих условий.

Характеристика битумного компаунда

Компаунд приготовлен на основе битума и нитрата натрия при соотношении 35/65 по массе. Скорость горения составила $0,11$ кг/с·м² [8].

Битум. Основной состав, % (масс): углерод до 85, водород до 15, сера не более 1,5, кислород ~ 2, азот — доли процента.

Плотность: $1,02$ г/см³.

Температура самовоспламенения: 380 — 397 °С [3].

Удельная теплоемкость: $2,3 \cdot 10^{-3}$ Дж/кг·град (при $T = 300$ °С) [2].

Коэффициент теплопроводности: $1,45$ Вт/м·град. [2].

Теплота сгорания: $40,95$ МДж/кг [17].

Солевой наполнитель. Нитрат натрия.

Молярная масса: $84,99$ г/моль.

Плотность: $2,26$ г/см³.

Температура разложения: 380 °С.

Молярная теплоемкость: 67 Дж/моль·К.

Захоронение РАО

При нагревании происходит разложение соли по реакции



Схема кондиционирования и захоронения битумного компаунда

Битумный компаунд расфасован в тонкостенные металлические бочки объемом 200 л. Четыре бочки, заполненные битумным компаундом, размещены в контейнере НЗК-150-1,5П, пустоты заполнены буферным наполнителем на основе глинопорошка, контейнер закрыт крышкой и загерметизирован (упаковка для захоронения) (рис.1).

Упаковки с РАО устанавливаются в отсеке ПЗРО послойно с заполнением зазоров между



Рис. 1. Упаковка для захоронения РАО с использованием контейнера НЗК-150-1,5П

Основные характеристики контейнера НЗК-150-1,5П

Масса порожнего контейнера (с крышкой), т	4,3
Масса контейнера с отходами (не более), т	7,3
Емкость контейнера, м ³	1,5
Толщина стенок, мм	150
Габариты контейнера, мм	1650×1650×1375



Рис. 2. Размещение упаковок РАО в отсеке ПЗРО

ними глинопорошком. Высота слоев контейнеров — 6 рядов (рис. 2).

Расчет теплового режима

Целью расчета было определение изменения температуры в контейнерах хранилища при возгорании одного из контейнеров. Предполагаем, что внутри контейнера находится 0,8 м³ компаунда. Тогда масса битума в 800 л компаунда: $1272 \cdot 0,35 = 445,2$ кг. Тепловыделение от сгорания этого количества битума составит: $41 \cdot 445,2 = 182 \cdot 10^8 = 1,82 \cdot 10^{10}$ [МДж]. Скорость горения 0,11 кг/с·м², тогда при площади горения 1 м² время горения компаунда в контейнере составит примерно $t = 4000$ секунд. Если выделяемую энергию пересчитать на мощность, выделяемую на м³ в горящем контейнере, то получим $1,82 \cdot 10^{10} / (4 \cdot 10^3 \cdot 0,8)$ [Дж/(с·м³)] = $5,7 \cdot 10^6$ [Вт/м³].

Для расчета распространения тепла использовалась 3DМКЭ программа FENIA [18]. Сеточное разбиение создавалось на части захоронения, которая включала горящий контейнер и по несколько контейнеров его окружающих. На рис. 3 представлено сеточное представление, разрезанное вертикальной плоскостью, на котором последовательно представлены все компоненты захоронения и общая сетка.

В качестве граничных условий на внешних поверхностях задавалось отсутствие потока тепла (консервативная оценка). Программой рассчитывался тепловой режим в контейнерах захоронения при возгорании среднего контейнера (третьего сверху). Отметим, что указанная выше скорость горения будет несколько завышена, поскольку наличие бочек в контейнере будет препятствовать распространению поверхности

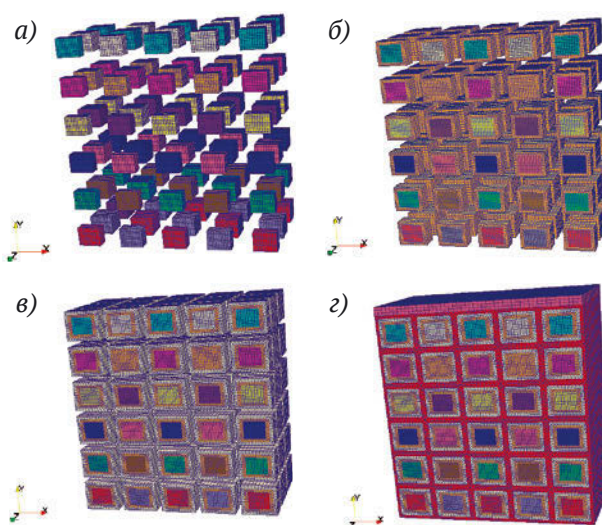


Рис. 3. Разрез вертикальной плоскостью сетки: а) компаунд, б) компаунд и засыпка внутри контейнера; в) компаунд, засыпка внутри контейнеров и бетон контейнеров; г) компаунд, засыпка внутри контейнеров, бетон контейнеров, засыпка между контейнерами и бетонная плита

горения. Поэтому, чтобы убрать указанную неопределенность, расчеты проводились с различными скоростями горения (время сгорания битума в контейнере 1,1 ч = 4000 с, 11,1 ч, 111 ч). Результаты расчетов с зависимостью температур

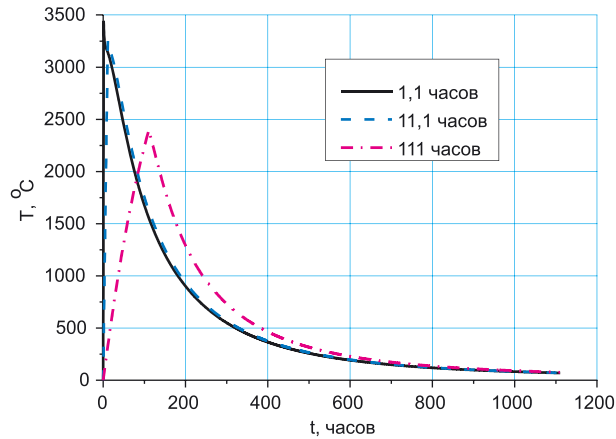


Рис. 4. Зависимость температуры от времени в горящем компаунде при разной скорости сгорания компаунда в контейнере

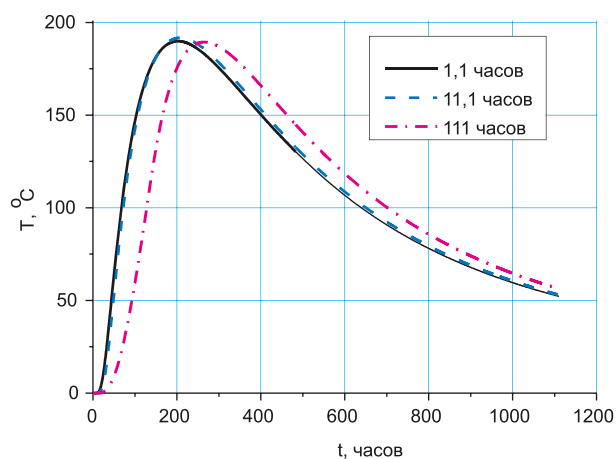


Рис. 5. Зависимость температуры от времени в контейнере, находящемся сбоку от горящего

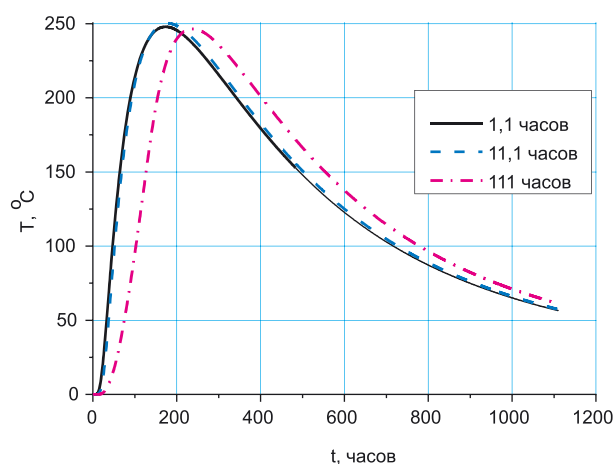


Рис. 6. Зависимость температуры от времени в контейнере, находящемся ниже горящего

в контейнерах от времени при разных временах сгорания представлены на рис. 4–6. При этом для контейнера, находящегося сбоку от горящего (рис. 5), и контейнера, находящегося снизу горящего (рис. 6), для представления выбраны точки сетки, находящиеся ближе всего к горящему контейнеру (т. е. узлы с наибольшей температурой в соответствующем контейнере). Отметим, что при небольших скоростях горения (сгорание всего материала контейнера меньше 11 часов) изменение скорости горения оказывает малое влияние на температуру в контейнерах.

Дополнительно были проведены расчеты варианта возгорания верхнего контейнера, в этом случае температура в соседних контейнерах будет меньше, чем при возгорании среднего контейнера, поэтому результаты этого расчета не приводятся.

Таким образом, при возгорании одного из контейнеров в ПЗРО температура в соседних контейнерах не превысит 250 °С, что значительно ниже температуры самовоспламенения битумных компаундов.

Выводы

1. Битумный компаунд, полученный при битумировании кубовых остатков ЖРО АЭС, может быть отнесен к удаляемым радиоактивным отходам 3 класса.

2. При длительном хранении битумного компаунда возможно протекание процессов изменения фракционного состава битума с увеличением содержания асфальтеновой фракции и седиментации солевых частиц наполнителя, приводящих к изменению его свойств, которые могут отрицательно сказаться на безопасности его захоронения, особенно при наливной загрузке в отсеки большого объема.

3. Наиболее предпочтительным является захоронение битумного компаунда в отдельных упаковках. Одним из вариантов кондиционирования битумного компаунда может быть изготовление транспортных упаковок и упаковок для его захоронения на основе невозвратного защитного контейнера НЗК-150-1,5П.

4. Требования к системам и способам размещения упаковок битумного компаунда в ПЗРО, а также требования к их огнестойкости должны быть рассмотрены и обоснованы в проекте.

5. При разработке технологии кондиционирования битумного компаунда должен быть предусмотрен его перевод в монолитное состояние и приведение к виду, отвечающему основным показателям качества, установленным требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

6. Проведенными расчетами установлено, что использование в качестве упаковки для захоронения невозвратного защитного контейнера НЗК-150-1,5П обеспечивает нераспространение процесса горения битумного компаунда.

Литература

1. *Соболев И. А., Хомчик Л. М.* Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 128 с.
2. *Гун Р. Б.* Нефтяные битумы. — М.: «Химия», 1973. — 432 с.
3. *Никифоров А. С., Захарова К. П., Поляков А. С.* Физико-химические основы битумирования жидких радиоактивных отходов АЭС с РБМК и свойства образующихся компаундов // Атомная энергия. 1986. Т. 61, вып. 3. С. 159—162.
4. ГОСТ Р 52126-2003 Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания.
5. *Никифоров А. С., Борзунов А. И., Вотинцев А. Ф.* и др. Установка для битумирования жидких радиоактивных отходов Ленинградской АЭС // Атомная энергия. 1986. Т. 61, вып. 3. С. 162—166.
6. *Баратов А. Н.* и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. — М.: «Химия», 1990. — 453 с.
7. *Захарова К. П., Земский Г. Т., Куцук В. А.* и др. К вопросу о пожаробезопасности процесса битумирования жидких радиоактивных отходов АЭС и хранения битумного компаунда // Атомная энергия. 1986. Т. 61, вып. 5. С. 387—388.
8. *Захарова К. П., Куличенко В. В., Назин Е. Р.* и др. О пожаро- и взрывобезопасности процесса битумирования // Атомная энергия. 1978. Т. 44, вып. 5. С. 436—437.
9. *Никифоров А. С., Жихарев М. И., Землянхун В. И.* и др. Обращение с радиоактивными отходами АЭС и регенерации отработавшего ядерного топлива // Атомная энергия. 1981. Т. 50, вып. 2. С. 128—136.
10. *Жукова С. В., Могильницкий Г. М., Захарова К. П.* и др. Исследование биостойкости компаундов на основе органических связующих, образующихся при отверждении жидких отходов среднего уровня активности // Атомная энергия. 1982. Т. 5, вып. 5. С. 326—329.
11. *Ojovan M. I., Ojovan N. V., Golubeva Z. I., Starceva I. V., Barinov A. S.* Aging of a bitumen waste form in wet repository conditions // Materials Research Society Symp. Proc. 2002. Vol. 713. ©.
12. НП-019-15 Сбор, переработка и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. — М.: Ростехнадзор, 2015. 22 с.
13. НП-093-14 Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. — М.: Ростехнадзор, 2014. 24 с.
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 ноября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения РАО к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых РАО».
15. ГОСТ 12.1.044-89 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
16. НП-053-16 Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. — М.: Ростехнадзор, 2016. 80 с.
17. *Аббасов В. М., Мамедов Ф. Ф., Исмаилов Т. А.* Теплоты сгорания горючих сланцев, битума и их смесей // Химия твердого топлива. 2008. № 4 С. 61—63.
18. *Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N.* Finite element code FENIA verification and application for 3D modelling of thermal state of deep geological storage of radioactive waste // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891, 012174.

Информация об авторах

Баринов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Дробышевский Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: drobyshevsky@inbox.ru.

Библиографическое описание статьи

Баринов А. С., Дробышевский Н. И. Свойства битумных компаундов и требования к их захоронению // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 37—45.

PURPOSES OF BITUMINOUS COMPOUNDS AND REQUIREMENTS FOR THEIR DISPOSAL

Barinov A. S., Drobyshevskiy N. I.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received 30 January 2019

The analysis of results investigation of bituminous radioactive waste properties is carried out in the article, including the results of long-term tests in conditions imitating near-surface disposal. The assessment of their characteristics compliance with the requirements of federal rules and regulations in the field of atomic energy use for their disposal has been carried out.

Key words: nuclear power plants, liquid radioactive waste, bituminization, bituminous compound, bituminous compound disposal/

References

1. Sobolev I. A., Khomtchik L. M. Processing of radioactive waste at centralized facilities. M.: «Energoatomizdat», 1983, 128 p. (In Russian)
2. Gun R. B. Oil bitumen. M.: «Khimiya», 1973, 432 p. (In Russian)
3. Nikiforov A. S., Zakharova K. P., Polyakov A. S. Physical and chemical basis for bituminizing radioactive waste of NPP with RBMK reactor and properties of the generated compounds. *Atomnaya energiya*, 1986, v. 61, iss. 3, pp. 159–162. (In Russian)
4. GOST R 52126-2003. Radioactive waste. Determining chemical stability of solidified high-level waste using the long-term leaching method. (In Russian)
5. Nikiforov A. S., Borzunov A. I., Votintsev A. F., et al. Installation for bituminization of radioactive waste of Leningrad NPP. *Atomnaya energiya*, 1986, v. 61, iss. 3, pp. 162–166. (In Russian)
6. Baratov A. N. et al. Fire and explosion hazards of materials and means for fire extinguishing. M.: “Khimiya”, 1990, 453 p. (In Russian)
7. Zakharova K. P., Zemskiy G. T., Kuschuk V. A. et al. About the fire safety of the process of radioactive waste bituminization of NPP and storage of bitumen compound. *Atomnaya energiya*, 1986, v. 61, Iss. 5, pp. 387–388. (In Russian)
8. Zakharova K. P., Kulichenko V. V., Nazin E. R. et al. Fire and explosion safety of bituminization process. *Atomnaya energiya*, 1978, v. 44, iss. 5, pp. 436–437. (In Russian)
9. Nikiforov A. S., Zhikharev M. I., Zemlyanukhin V. I., et al. Management of radioactive waste at NPP and regeneration of spent nuclear fuel. *Atomnaya energiya*, 1981, v. 50, iss. 2, pp. 128–136. (In Russian)
10. Zhukova S. V., Mogilnitskiy G. M., Zakharova K. P. et al. Study of bioresistance of compounds based on organic binders generated in solidification of medium-level liquid radioactive waste. *Atomnaya energiya*, 1982, v. 5, iss. 5, pp. 326–329. (In Russian)
11. Ojovan M. I., Ojovan N. V., Golubeva Z. I., Starceva I. V., Barinov A. S. Aging of a bitumen waste form in wet repository conditions // *Materials Research Society Symp. Proc*, 2002, vol. 713.
12. NP-019-15 Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements. M.: Rostekhnadzor, 2015, 22 p. (In Russian)
13. NP-093-14 Criteria for acceptance of radioactive waste for disposal. M.: Rostekhnadzor, 2014, 24 p. (In Russian)
14. Decree of the Government of the Russian Federation of 19 November 2012 No.1069 “On the criteria of designation of solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria of radioactive waste designation as special radioactive waste and removable radioactive waste and criteria of classification of removable radioactive waste”. (In Russian)
15. GOST 12.1.044-89 Fire and explosion safety of substances and materials. Inventory of parameters and methods of their definition. (In Russian)
16. NP-053-16 Safety rules in transportation of radioactive materials. M.: Rostekhnadzor, 2016. 80 p. (In Russian)
17. Abbasov V.M. Mamedov F.F. Ismailov T.A. Combustion heat of combustible shales, bitumen and their mixtures. *Khimiya tverdogo topliva*, 2008, no. 4, pp. 61 - 63. (In Russian)
18. Butov R. A., Drobyshevskiy N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. Finite element code FENIA verification and application for 3D modelling of thermal state of deep geological storage of radioactive waste. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, 012174.

Information about the authors

Barinov Aleksandr Sergeevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute (52, BolshayaTul'skaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Drobyshevskiy Nikolay Ivanovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute (52, BolshayaTul'skaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: drobyshvsky@inbox.ru.

Bibliographic description

Barinov A. S., Drobyshevskiy N. I. Purposes of Bituminous Compounds and Requirements for their Disposal. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 37–45. (In Russian).