ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СПбГУ)

Институт наук о Земле

Кафедра геоэкологии и рационального природопользования

**Логинова Арина Олеговна**

**Сравнение воздействий на окружающую среду битумирования и цементирования РАО**

Магистерская диссертация по направлению 05.04.06 «Экология и природопользование».

Научный руководитель:

д.ф.-м..н., проф. Г. Н. Белозерский

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2017

Заведующий кафедрой:

д.б.н., проф. В. Н. Мовчан

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2017

Санкт-Петербург

2017

Содержание

Аннотация

Введение

Глава 1. Система обращения с радиоактивными отходами …………………………8

1.1. Классификация РАО………………………………………………………………...9

1.2 Схема обращения с РАО………………………………...…………………………18

1.3 Структура радиоактивных отходов в Ленинградской области……………….…27

Глава 2. Битумирование и цементирование РАО…………………………..…..…….34

2.1 Воздействие битумирования на окружающую среду ….……………...…………34

2.2 Воздействие цементирования на окружающую среду ………………….........….46

Глава 3. Обоснование приоритетного метода по отверждению РАО в Ленинградской области.………………………………………………………………………..54

Заключение

Список литературы

Приложение 1(список терминов)

**Аннотация**

|  |  |
| --- | --- |
| Автор | Логинова Арина Олеговна |
| Название магистерской диссертации | Сравнение воздействий на окружающую среду битумирования и цементирования РАО |
| Факультет | Институт наук о Земле |
| Специальность, профиль | Экология и природопользование, профиль «Геоэкологический мониторинг» |
| Год | 2017 |
| Научный руководитель | Доктор физико-математических наук, профессор Белозерский Геннадий Николаевич |
| Описание цели, задач и основных результатов | Цель: выполнить сравнительный анализ воздействий на окружающую среду от нерадиоактивных загрязняющих веществ двух методов отверждения РАО и выявить, исходя из характеристик радиоактивных отходов, образующихся на территории Ленинградской области, какой тип установки по переработке РАО будет приоритетным для данного региона.  Задачи: проанализировать существующие подходы к классификации РАО и дать характеристику схемы обращения с РАО; изучить характер и структуру РАО, образующихся на территории Ленинградской области; проанализировать характер воздействия на окружающую среду методов битумирования и цементирования РАО; дать рекомендации по выбору приоритетного метода отверждения РАО на территории Ленинградской области.  В ходе исследования был проведен анализ образующихся РАО на территории Ленинградской области, дана сравнительная характеристика двух самых распространённых методов отверждения РАО, и выбран приоритетная установка для Ленинградской области. |
| Ключевые слова | Радиоактивные отходы, битумирование, цементирование, окружающая среда, кондиционирование радиоактивных отходов, обращение с радиоактивными отходами, отверждение радиоактивных отходов, приоритетная установка. |

**Введение**

Современный мир невозможно представить без атомной энергетики, использования радиоактивных изотопов и излучений в медицине, геологии, энергетике, промышленности и во многих других практических сферах. Сегодня атомная энергетика дает свыше 14% мирового производства электроэнергии и около 17% в России [1,2]

Атомная энергетика часто сталкивается с негативным отношением со стороны общества. Это связано с целым рядом причин. Во-первых, с вопросами обеспечения безопасной эксплуатации атомных станций и в отношении воздействия радиации на человека и окружающую среду. Во-вторых, с возникновением ассоциативного ряда у населения с ядерным оружием. И, в-третьих, с завершающими этапами ядерного топливного цикла – обращением с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами и выводом из эксплуатации объектов использования атомной энергии [3].

Существование «исторических» радиоактивных отходов является серьезной проблемой атомной отрасли, данные отходы принято называть термином «ядерное наследие», их наличие связано в основном с начальным этапом становления атомной индустрии, когда на первый план ставились вопросы создания ядерного оружия.

Результатом практики откладывания решения проблемы переработки радиоактивных отходов стало систематическое накопление данных веществ в больших количествах во всех «ядерных державах», в том числе и в России, основной правоприемницей СССР в вопросах радиационных технологий.

Именно это объясняет актуальность исследования в области переработки радиоактивных отходов.

Цель исследования – выполнить сравнительный анализ воздействий на окружающую среду от нерадиоактивных веществ двух методов отверждения РАО и выявить, исходя из характеристик радиоактивных отходов, образующихся на территории Ленинградской области, какой тип установки по переработке РАО является приоритетным для данного региона.

Достижение поставленной цели определило необходимость последовательного решения следующих задач:

* проанализировать существующие подходы к классификации РАО и дать характеристику схемы обращения с РАО;
* изучить характер и структуру РАО, образующихся на территории Ленинградской области;
* проанализировать характер воздействия на окружающую среду установок битумирования и цементирования РАО;
* дать рекомендации по выбору приоритетного метода отверждения РАО на территории Ленинградской области.

Объектом исследования являются такие методы отверждения радиоактивных отходов, как битумирование и цементирование.

Предметом исследования является воздействие на окружающую среду методов отверждения радиоактивных отходов (битумирование и цементирование), проявляющееся в загрязнении ее радионуклидами.

В основу исследования положены работы отечественных и зарубежных авторов по теории и практике обращения с радиоактивными отходами.

Выводы работы ос­новываются на ре­зультатах анализа существующей системы обращения с радиоактивными отходами на территории Ленинградской области.

Информационную и эмпирическую базу исследованиясоставили данные, содержащиеся в офици­ально пуб­ли­куемых годовых экологических отчетах предприятий, входящих в состав государственной корпорации «Росатом», а также данные, полученные автором в ходе прохождения научно-исследовательской практики, методические материалы, регламентирующие обращение с радиоактивными отходами и определяющие порядок расчета выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух, исследования отечественных и зарубежных ученых, справочные изда­ния, аналитиче­ские докла­ды и отчеты, а также информационные ресурсы Интернет, собранные и проанализированные автором.

Нормативно-правовой базой исследования послужили нормативные документы, регулирующие сферу, связанную с радиационной безопасностью:

1. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009" (утв.постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. N 47);
2. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ «Об использованииатомнойэнергии» (последняя редакция 3 июля 2016 г.);
3. Федеральный закон от 9 января 1996 г. N 3-ФЗ  
   "О радиационной безопасности населения" (последняя редакция 19 июля 2011);
4. Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ  
   "Об охране окружающей среды" (последняя редакция 03 июля 2016);
5. СанПиН 2.6.1.1281-03Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы "Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ) от 15 марта 2003 г.;
6. Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. N 390-ФЗ «Обезопасности». (последняя редакция 05 октября 2015);
7. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. N 190-ФЗ  
   "Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (последняя редакция 2 июля 2013 г.);
8. Постановление от 10 сентября 2012 г. № 899 «Об утверждении положения о передаче радиоактивных отходов на захоронение, в том числе радиоактивных отходов, образовавшихся при осуществлении деятельности, связанной с разработкой, изготовлением, испытанием, эксплуатацией и утилизацией ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения»;
9. Указ Президента РФ от 13.02.14 № 79 «Об организации федерального государственного надзора в области ядерной и радиационной безопасности ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения и в области физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов на ядерных объектах».

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Проведен комплексный анализ отчетной документации предприятий атомной отрасли Ленинградской области, позволивший определить структуру радиоактивных отходов, образующихся на территории региона;
2. Определены критерии для выполнения сравнительного анализа методов отверждения радиоактивных отходов (битумирование и цементирование);
3. Установлено, что на территории Ленинградской области приоритетным методом отверждения радиоактивных отходов является цементирование.

Практическая значимость результатов исследова­ниязаключается в возможности использования теоретических выводов работы для обоснования приоритета использования метода цементирования для отверждения радиоактивных отходов на территории Ленинградской области.

Следует отметить, что в процессе исследования я столкнулась с «закрытостью» атомной отрасли и нежеланием предприятий, входящих в нее, сотрудничать со специалистами в области экологии и природопользования в части предоставления информации о количествах, накопленных и образующихся ежегодно радиоактивных отходов, а также информацию о методах из кондиционирования. Детальной информации по данному направлению нет, за исключением публикуемых годовых отчетов предприятий атомной отрасли. Единственное предприятие, которое пошло нам на встречу, это Ленинградское отделение Северо-Западного филиала ФГУП «РосРАО», в котором автор проходил научно-исследовательскую практику летом 2016 г.

**Глава 1. Система обращения с радиоактивными отходами**

Радиоактивные отходы (РАО) в процессе стандартной деятельности образуются во всех отраслях атомной промышленности: на атомных электростанциях (АЭС) и радиохимических заводах, на предприятиях, обслуживающих корабли с ядерными энергетическими установками, и промышленных предприятиях, применяющих радионуклиды, в научно-исследовательских и медицинских центрах. В 2015 году на территории РФ образовалось 1,8·106 м3 РАО, из них размещено в пунктах длительного хранения 9,2·105 м3. Объем накопленных РАО к 31 декабря 2015 года составил 5,6·108 м3, из них относящихся к категории «ядерного наследия» – 5,5·108 м3 [4].

Ядерное наследие в общепринятом понимании – это накопленные радиоактивные отходы и отработанное ядерное топливо, остановленные установки и объекты инфраструктуры, загрязненные территории [3]. К «ядерному наследию» относятся:

* остановленные, но не выведенные из эксплуатации здания, участки и технологические установки, которые использовались для производства топлива для промышленных уран (графитовых реакторов и иных материалов в оборонных целях;
* накопленные в хранилищах, построенных в конце 1940-х гг., твердые и жидкие РАО, а также наличие значительных по объемам и удельной активности хвостохранилищ;
* остающиеся до настоящего времени на территориях промышленных площадок участки радиационного загрязнения.

На решение проблемы «ядерного наследия» в Российской Федерации направлена федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 - 2020 годы и на период до 2030 года» [5], в задачи которой входит:

* создание объектов инфраструктуры по обращению с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), включая мощности по переработке всех видов накопленного ОЯТ и РАО, а также пунктов захоронения РАО всех классов;
* перевод объектов ядерного наследия в безопасное для окружающей среды состояние;
* завершение исполнения государственных обязательств, связанных с последствиями прошлой деятельности предприятий атомной отрасли.

В ходе выполнения данной программы планируется ввести в эксплуатацию места по захоронению РАО, что позволит за период до 2039 год захоронить ~1,8·105м3 радиоактивных отходов (работы в данном направлении начались в 2016 г) [5].

Из предыдущих данных по образованию отходов на территории Российской Федерации видно, что по данной ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 - 2020 годы и на период до 2030 года» за время работы программы будут захоронено отходов на один порядок меньше, чем образуется за год.

В федеральном законе № 190 радиоактивные отходы определены следующим образом – это не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание искусственных или естественных радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами и правилами, и они становятся потенциальными источниками радиационной опасности, т.е. могут оказать негативное воздействие на человека и объекты окружающей среды [6].

Радиоактивные отходы, образующиеся в процессе деятельности во всех отраслях атомной промышленности, значительно отличаются друг от друга агрегатным состоянием, химическим и ранионуклидным составами.

**1.1 Классификация РАО**

Радиоактивные отходы образуются на установках разного вида и в различных формах с различными физическими и химическими характеристиками и с широким диапазоном концентрации составляющих их радионуклидов. Эти различия приводят к широкому спектру вариантов классификации отходов.

Существует достаточно большое количество критериев и признаков, по которым могут быть классифицированы радиоактивные отходы.

Приведем некоторые из них:

1. происхождение;
2. активность радионуклидов;
3. агрегатное состояние;
4. период полураспада радионуклидов.

В зависимости от источника происхождения все РАО можно условно разделить на:

* отходы, образующиеся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) на всех его стадиях;
* отходы, не связанные с ЯТЦ (отходы, образовавшиеся в результате научной деятельности, медицинские и бытовые отходы);
* отходы (загрязненные материалы), образующиеся при ликвидации радиационных аварий, природных аномалий и военной деятельности (загрязненные грунты, промывочные воды, транспортные средства и оборудование и др.).

Впервые вопросы международной классификации радиоактивных отходов были подняты МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) в нормах безопасности обращения с радиоактивными отходами в 1970 году, а в 1981 и 1994 годах были опубликованы пересмотренные документы [7].

В МАГАТЭ рекомендована классификация по степени опасности радиоактивных отходов для человека. В соответствии с этим выделяются три категории РАО:

1) высокоактивные отходы (ВАО);

2) низко- и среднеактивные отходы (НАО и САО);

3) безопасные.

В классификации, опубликованной МАГАТЭ в 1981 г. в классах САО и НАО также было проведено разграничение между отходами, содержащими короткоживущие радионуклиды, и отходами, содержащими долгоживущие радионуклиды, а также отходами, содержащими альфа-излучающие радионуклиды. Эта схема классификации оказалась полезной для общих целей, тем не менее, в схеме были выявлены ограничения. В частности, в схеме классификации отсутствовала полная логически последовательная связь с аспектами безопасности обращения с радиоактивными отходами, особенно при захоронении. С целью устранения этих ограничений и улучшения обмена информацией в 1994 году МАГАТЭ опубликовало измененную схему классификации. В качестве основы для этой схемы были выделены и использованы три основных класса отходов.

Для классификации радиоактивных отходов МАГАТЭ были разработаны различные схемы в соответствии с физическими, химическими и радиологическими свойствами, присущими конкретным установкам или условиям, в которых происходит обращение с радиоактивными отходами.

Различные виды отходов могут быть сгруппированы с точки зрения целей обращения с эксплуатационными радиоактивными отходами. Например, отходы, содержащие радионуклиды с коротким периодом полураспада, могут быть отделены от отходов, содержащих радионуклиды с более длительным периодом полураспада, или прессуемые отходы могут быть отделены от не прессуемых отходов.

В настоящее время МАГАТЭ в качестве основной классификации РАО использует схему, состоящую из 6 классов, основанных на приемлимости отходов к определенному типу хранения или конечного захоронении [7]:

1. Освобожденные от контроля отходы (EW / ОО)

Освобожденные отходы обладают такой малой активностью, что не требуют никаких мер радиационной защиты, независимо от того, осуществляется ли захоронение отходов в обычных траншеях с земляной засыпкой, или же отходы рециклируются. Такой материал может быть выведен из-под регулирующего контроля.

Границами активности для освобожденных отходов могут устанавливаться регулирующим органом в каждом отдельном случае, при условии учета конкретных национальных условий, которые значительно влияют на сценарии облучения, или определения конкретных требований или условий для изъятия или освобождения отходов от регулирующего контроля.

Эффективные дозы, получаемые отдельными лицами составляют 10 мкЗв в год [7]. Для учета возникновения маловероятных событий, приводящих к повышению радиационного облучения, использовался дополнительный критерий, а именно, эффективные дозы в результате таких маловероятных событий не должны превышать 1 мЗв в год[7].

2) Очень короткоживущие отходы (VSLW / ОКЖО): отходы, которые могут находиться на хранении до снижения радиоактивности (за счет снижения интенсивности деления ядер радиоактивных веществ во времени) в течение ограниченного периода времени - до нескольких лет, а затем выводиться из-под регулирующего контроля.

Примерами очень короткоживущих отходов являются, отходы содержащие в своем составе 192Ir и 99mTc и содержащие другие радионуклиды с коротким периодом полураспада, образующиеся в результате промышленных и медицинских применений.

Такие отходы могут храниться до тер пор, пока активность не упадет ниже уровня освобождения от контроля, что позволит обращаться с освобожденными отходами как с нерадиоактивными.

Границы для периодов полураспада преобладающих радионуклидов не могут быть определены в общем, потому что они зависят от предполагаемой продолжительности хранения и начальной активности отходов.

3) Очень низкоактивные отходы (VLLW / ОНАО): отходы, которые не обязательно соответствуют критериям ОО, но которые не требуют высокого уровня локализации и изоляции и, следовательно, подходят для захоронения на установках приповерхностного захоронения (траншеи с земляной засыпкой) с ограниченным регулирующим контролем. Такие захоронения типа траншей с земляной засыпкой могут также содержать другие опасные отходы. Типичные отходы, относимые к этому классу, включают почвы и щебень с низкой активностью. Активность долгоживущих радионуклидов в ОНАО, как правило, очень ограничены**.**

Значительные объемы отходов образуются при эксплуатации и выводе из эксплуатации ядерных установок с активностью на уровне или чуть выше уровней, установленных для освобождения материала от регулирующего контроля. Другие отходы, содержащие природные радионуклиды, могут образовываться в результате добычи и переработки руд и полезных ископаемых. Обращение с такими отходами, в отличие от освобожденных отходов, требует учитывать аспекты радиационной защиты и безопасности, но при этом степень принятия необходимых мер ограничена по сравнению с мерами, необходимыми для отходов более высоких классов (НАО, САО или ВАО).

1. Низкоактивные отходы (LLW / НАО): отходы, активность которых выше, чем активность у ОО, но в состав которых входят долгоживущие радионуклиды(в ограниченных количествах. Из-за содержания долгоживущих радионуклидов такие отходы требуют надежной изоляции и локализации на срок до нескольких сотен лет, они пригодны для захоронения в приповерхностных пунктах с инженерно-техническими барьерами. Данный вид отходов приемелем для приповерхностного захоронения.
2. Среднеактивные отходы (ILW / САО):

Четко разграничить НАО и САО сложно, поскольку ограничения по допустимой активности будут отличаться между отдельными радионуклидами или группами радионуклидов.

В некоторых государствах был принят предел для долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов, составляющий в среднем 400 Бк/г (до 4000 Бк/г для отдельных упаковок) [7]. Для долгоживущих бета- и/или гамма-излучающих радионуклидов, таких как 14C, 36Cl, 63Ni, 93Zr, 94Nb, 99Tc и 129I, допустимые средние активности могут быть значительно выше (до десятков килобеккерелей на грамм) и могут зависеть от конкретной и установки для захоронения.

1. Высокоактивные отходы (HLW / ВАО):

Высокоактивные отходы определяются как отходы с высокой активностью как короткоживущих, так и долгоживущих радионуклидов, что по сравнению с САО для обеспечения долгосрочной безопасности они требуют большей степени локализации и изоляции от доступной окружающей среды. Такие локализация и изоляция обычно обеспечиваются целостностью и стабильностью глубоких геологических систем захоронения, дополненных инженерно-техническими барьерами.

ВАО обычно обладают удельной активностью в диапазоне 104-106 TБк/м3(например, для свежего отработавшего топлива энергетических реакторов, которые некоторые государства считают радиоактивными отходами).

ВАО генерируют значительное количество тепла в результате радиоактивного распада и сохраняют способность к выделению тепла на длительный срок. Тепловыделение является важным фактором, который необходимо принимать во внимание при проектировании установок геологического захоронения.

ВАО включают кондиционированные отходы, получаемые в результате переработки отработавшего топлива вместе с любыми другими отходами, требующими сопоставимой степени локализации и изоляции. Во время захоронения после нескольких десятилетий охлаждения отходы, обладают удельной активностью около 104 TБк/м3. В целях информации можно сказать, что до создания установок для захоронения ВАО национальные компетентные органы могут определять, что некоторые виды отходов относятся к САО или к ВАО на основе типовых обоснований безопасности.

В Российской Федерации в настоящее время действует установленная Федеральным законом № 190 от 11 июля 2011 года «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» следующая классификация радиоактивных отходов [6]:

1) удаляемые радиоактивные отходы - радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, не превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения;

2) особые радиоактивные отходы - радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения.

Критерии отнесения РАО к особым или к удаляемым устанавливаться Правительством Российской Федерации.

В свою очередь удаляемые РАО в целях захоронения делятся на [6]:

1) в зависимости от периода полураспада содержащихся в радиоактивных отходах радионуклидов - долгоживущие радиоактивные отходы, короткоживущие радиоактивные отходы;

2) в зависимости от удельной активности - высокоактивные радиоактивные отходы, среднеактивные радиоактивные отходы, низкоактивные радиоактивные отходы, очень низкоактивные радиоактивные отходы;

3) в зависимости от агрегатного состояния - жидкие радиоактивные отходы, твердые радиоактивные отходы, газообразные радиоактивные отходы;

4) в зависимости от содержания ядерных материалов - радиоактивные отходы, содержащие ядерные материалы, радиоактивные отходы, не содержащие ядерных материалов;

5) отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения;

6) радиоактивные отходы, образовавшиеся при добыче и переработке урановых руд;

7) радиоактивные отходы, образовавшиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

Но так как до настоящего времени критерии отнесения РАО к удаляемым или особым не установлены Правительством РФ, то при обращении с РАО действует классификация, содержащаяся в Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010), утвержденных Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 [7].

Согласно данной классификации по агрегатному состоянию РАО подразделяются на жидкие (ЖРО), твердые (ТРО) и газообразные (ГРО).

Жидкие отходы считаются радиоактивными, если в них удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства (УВ), приведённые в приложении П-2 НРБ-99, например, для 137Cs и 239Pu при попадании радионуклидов в возду допустимая среднегодовая объемная активность соответственно равна 2,7 Бк/м3 и 2,5 Бк/м3[8]:

> 10 (1)

где *n* – количество нормируемых радионуклидов.

Твёрдые отходы считаются радиоактивными, если удельная активность радионуклидов в них превышает значения минимально значимой удельной активности (МЗУА), приведённой в приложении П-4 НРБ-99 (для137Cs и 239Pu МЗУА соответственно равна 1 E+01 Бк/г и 1 E+00[5]) .

При известном радионуклидном составе в отходах они считаются радиоактивными, если сумма отношений удельной активности радионуклидов к их минимально значимой активности превышает 1:

>1 (2)

где *n* – количество радиоактивных изотопов в отходах.

При неизвестном радионуклидном составе твёрдые отходы считаются радиоактивными, если их удельная активность больше:

* 100 *кБк*/*кг* – для бета-излучающих радионуклидов;
* 10 *кБк*/*кг* – для источников альфа-излучающих радионуклидов;
* 1 *кБк*/*кг* – для трансурановых радионуклидов.
* Гамма-излучающие отходы неизвестного состава считаются радиоактивными, если мощность поглощённой дозы у их поверхности (на расстоянии 0,1 *м*) превышает 0,001 *мГр*/*ч* над фоном при соблюдении условий измерения в соответствии с утвержденными методиками.

Жидкие и твёрдые РАО подразделяются по удельной активности на три категории (табл.1)

Таблица 1. Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов по удельной активности [9]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Категория отходов | Удельная активность, кБк/кг | | | |
| тритий | бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий) | альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые) | трансурановые радионуклиды |
|  | Твердые отходы | | | |
| Очень низкоактивные | до 107 | до 103 | до 102 | до 101 |
| Низкоактивные | от 107 до 108 | от 103до 104 | от 102 до 103 | от 101 до 102 |
| Среднеактивные | от 108 до 1011 | от 104 до 107 | от 103 до 106 | от 102 до 105 |
| Высокоактивные | более 1011 | более 107 | более 106 | более 105 |
| Жидкие отходы | | | | |
| Низкоактивные | до 104 | до 103 | до 102 | до 101 |
| Среднеактивные | от 104 до 108 | от 103 до 107 | от 102 до 106 | от 101 до 105 |
| Высокоактивные | более 108 | более 107 | более 106 | более 105 |

Для предварительной сортировки твердых отходов рекомендуется использование критериев по мощности дозыгамма-излучения на расстоянии 0,1 *м* от поверхности при соблюдении условий измерения в соответствии с утвержденными методиками [9]:

низкоактивные – от 0,001 *мГр*/*ч* до 0,3 *мГр*/*ч*;

среднеактивные – от 0,3 *мГр*/*ч* до 10 *мГр*/*ч*;

высокоактивные – более 10 *мГр*/*ч*.

При обращении с РАО, помимо их агрегатного состояния и удельной активности, должны учитываться и другие их физические и химические характеристики, в частности, взрыво- и огнеопасность, органические или неорганические и т.п.

Существует еще одна классификация РАО, основанная на изложенных выше и используемая ФГУП «Национальный Оператор РАО» (рис. 1).

Рисунок 1. Классификация РАО [10]

Преимуществом данной классификация является то, что в ней учитывается способ захоронения радиоактивных отходов, в других российских классификациях не рассматривают данный важный аспект.

Представленные выше виды классификаций РАО характерны для нашей страны, но существуют и другие виды деления радиоактивных отходов на классы. Например, в США существует следующий вид классификации:

* High level waste (HLW) – высоко радиоактивный материал, образующийся в результате переработки отработавшего топлива, включая жидкие отходы, и любой твердый материал, полученный из таких жидких отходов, который содержит продукты деления в значительной концентрации, и другой высокорадиоактивный материал, который Комиссия по ядерному урегулированию (NRC) США в соответствии с существующим законом определяет как материал, требующий постоянной изоляции. В разомкнутом топливном цикле отработавшее ядерное топливо рассматривается в качестве высокоактивных отходов;
* Transuranic waste (TRU) – отходы, содержащие альфа- излучающие изотопы с атомным номером большем чем 92, с периодом полураспада больше пяти лет и активностью больше чем 3,7·106 Бк/кг;
* Low level waste (LLW) – низкоактивные отходы, не являющиеся HLW или TRU;
* Хвосты горнодобывающих заводов;
* Природный материал или материал, произведенный на ускорителях, который классифицируется как LLW с точки зрения захоронения (регулируется не NRC, а индивидуальными штатами) [11].

Основным отличием данной классификации от принятой в Российской Федерации является:

* Отсутствие класса среднеактивных отходов в американской классификации;
* Включение в классификацию отдельными пунктами хвосты горнодобывающих заводов и природные материалы, которые в российском аналоге причисляются к низкоактивным отходам (в случае с хвостами горнодобывающих заводов) и к освобожденным от контроля (в случае с природными материалами);
* В российской классификации отходы разделены по агрегатному состоянию, что в последующем определяет выбор метода обращения с радиоактивными отходами.

На основании проведенного анализа существующих схем классификации радиоактивных отходов следует выделить основные критерии, по которым радиоактивные отходы разделяют на классы – это агрегатное состояние, удельная активность, период полураспада, содержащихся в отходах радионуклидов, происхождение и способ захоронения.

Таким образом, нами был проведен анализ существующих подходов к классификации РАО, благодаря которому была выбрана классификация, приведенная в ОСПОРБ - 99/2010. Она является наиболее систематизированной и полной, данная классификация охватывает сразу два критерия – это агрегатное состояние и удельная активность, благодаря чему по этой классификации можно оценить воздействие на человека (удельная активность) и способ переработки с последующим хранением или захоронением. В этой связи в процессе исследования автором за основу была принята именно она.

**1.2 Схема переработки РАО**

Существующая в России система обращения с радиоактивными отходами сформировалась в процессе развития в СССР ядерных технологий и в силу этого имеет ряд характерных особенностей.

Прежде всего, она привязана к местам возникновения РАО и не объединена в единую систему обращения и контроля. Кроме того, места долговременного хранения и хранилища РАО различаются чрезвычайным разнообразием конструкций и форм, организацией защитных барьеров в зависимости от конкретной местности расположения объектов и пр. Все эти недостатки характерны не только для России, но и для большинства стран, обладающих ядерным наследием.

Решение данной ситуации решили начать на законодательном уровне со стартом ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [12], а также принятием федерального закона «Об обращении с радиоактивными отходами и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.11 № 190 (последняя редакция 02.07.13). Сейчас идет создание единой системы обращения с РАО.

Ниже рассмотрим принципиальную схему обращения с радиоактивными отходами.

Прежде всего необходимо разобраться, в результате какой деятельности образуются отходы.

Загрязненность радионуклидами внешней среды и образование различных радиоактивных отходов происходит в результате практической деятельности человека [13]:

* связанной с ядерным топливным циклом (ЯТЦ) (схема 1) – это вся последовательность повторяющихся производственных процессов, начиная от добычи топлива и заканчивая удалением радиоактивных отходов. В зависимости от вида ядерного топлива и конкретных условий ядерные топливные циклы могут различаться в деталях, но их общая принципиальная схема сохраняется.
* эксплуатации предприятий по добыче и переработке урановых руд;
* эксплуатации предприятий по производству естественного и обогащенного урана;
* эксплуатации предприятий по производству и изготовлению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ);
* эксплуатации и снятии с эксплуатации атомных электростанций (АЭС), атомных станций теплоснабжения (АСТ) и атомных теплоэлектроцентралей (АТЭЦ);
* эксплуатации предприятий по переработке и регенерации отработавшего ядерного топлива;
* не связанной с ядерным топливным циклом:
* эксплуатации исследовательских атомных реакторов;
* эксплуатации предприятий по изготовлению изотопных источников;
* использовании изотопной продукции в промышленности, науке, медицине, сельском хозяйстве;
* в процессе дезактивации объектов и реабилитации территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварий;
* связанной с военной деятельностью:
* проведении ядерных взрывов;
* эксплуатации и снятии с эксплуатации морских судов с ядерными энергетическими установками и баз их обслуживания;
* производство оружейного плутония.

Радиоактивные отходы после их образования, в целях уменьшения опасности подвергаются ряду процессов преобразования и перемещения перед их долговременным хранением или окончательным захоронением.

Последовательность процессов может различаться, но почти всегда она включает:

* сбор и сортировку РАО по категориям;
* обработку и уменьшение объема;
* кондиционирование;
* транспортирование;
* хранение или захоронение.

Для обращения с РАО действуют специализированные организации, имеющую лицензию на осуществления деятельности, связанной с РАО (например, ФГУП «РосРАО»).

Рассмотрим подробнее каждую стадию переработки радиоактивных отходов.

Первым этапом является сбор и сортировка отходов, которой подвергаются все радиоактивные отходы, образующиеся в ядерном топливном цикле, при обращении с источниками ионизирующего излучения и в других видах деятельности человека, не связанных с применением радиационных технологий (добыча нефти, газа, производство минеральных удобрений и т.д.). Данный этап различен для предприятий, относящихся к ЯТЦ и для предприятий не входящим в ЯТЦ.

Рассмотрим подробнее каждую стадию переработки радиоактивных отходов.

Первым этапом является сбор и сортировка отходов, которой подвергаются все радиоактивные отходы, образующиеся в ядерном топливном цикле, при обращении с источниками ионизирующего излучения и в других видах деятельности человека, не связанных с применением радиационных технологий (добыча нефти, газа, производство минеральных удобрений и т.д.). Данный этап различен для предприятий, относящихся к ЯТЦ и для предприятий не входящим в ЯТЦ.

Разведка

Превращение урана U3O8 в гексафторид UF8

Добыча

Обогащение ураном- 235

Реактор

Изготовление топливных сборок

Отработанное ядерное топливо

**Открытый ЯТЦ**

Завод по переработке ОЯТ

**Закрытый ЯТЦ**

Временное хранилище

Постоянное хранилище

Рисунок 2. Ядерный топливный цикл [13]

Рассмотрим подробнее каждую стадию переработки радиоактивных отходов.

Первым этапом является сбор и сортировка отходов, которой подвергаются все радиоактивные отходы, образующиеся в ядерном топливном цикле, при обращении с источниками ионизирующего излучения и в других видах деятельности человека, не связанных с применением радиационных технологий (добыча нефти, газа, производство минеральных удобрений и т.д.). Данный этап различен для предприятий, относящихся к ЯТЦ и для предприятий не входящим в ЯТЦ.

На каждой стадии ЯТЦ происходит сбор и сортировка отходов, чаще всего осуществляемая персоналом данного предприятия. Например, при разработке урановых месторождений проводится сортировка поднятых на поверхность пород. В зависимости от содержания урана в них, породу сортируют и направляют по соответствующей технологической цепочке в два отвала – для пустых пород и богатых руд. Масса рудного отвала подвергается дальнейшей переработке на рудо обогатительном производстве, где происходит ее измельчение и обогащение механическим путем. После этого материал отправляется на гидрометаллургический завод. Объемы перерабатываемых пород составляет около миллиона тонн. Количество образующихся отходов имеет тот же порядок величины, большая их часть классифицируется как безопасные, а вся активность обусловлена естественными радионуклидами, такие отходы относятся к классу низкоактивных, которые могут быть захоронены в приповерхностных хранилищах без ущерба для человека и окружающей среды.

Сбором и сортировкой отходов на предприятиях, не связанных с ЯТЦ занимается как собственный персонал, так и специализированные организации. Они выполняют свою работу в рамках частных заказов, либо государственных программ. При планировании организационных и технических мер по раздельному сбору отходов во внимание принимаются следующие факторы:

* физические и химические характеристики отходов;
* тип и период полураспада радионуклидов;
* активность радионуклидов в отходах;
* приемлемость отходов для определенных методов обработки;
* возможные или доступные методы хранения и захоронения.

Характер и состав радиоактивных отходов обычно определяется источником их образования. В частности, в медицине и в научных исследованиях, в определенных процедурах почти всегда используется один определенный радионуклид. В этом случае произвести раздельный сбор образующихся отходов в соответствии с их радионуклидным составом довольно просто. Отходы предприятий ЯТЦ могут и, как правило, содержат смесь радионуклидов. В этом случае разделение отходов должно основываться на результатах изучения радиохимических характеристик РАО, их удельной активности или уровня загрязнения.

После сортировки отходов необходимо провести стадию обработки и уменьшения объема отходов, для более безопасного и удобного транспортирования до пункта дальнейшей переработки РАО и дальнейшей изоляции от окружающей среды.

В современном мире, в основном, применяют четыре метода уменьшения объема поступивших на переработку отходов – это прессование, сжигание, обезвоживание и кристаллизация. Первые два метода чаще всего используют для низко- и среднеактивных отходов с короткоживущими изотопами.

Технология сжигания (прокаливания) в основном используется для уменьшения объема горючих отходов низкой активности. После прокаливания получают залу, которая содержит радионуклиды и требует дальнейшее кондиционирование методами цементирования или битуминизации. Также для дальнейшего снижения объема зольных отходов может использоваться технология прессования. Процесс сжигания позволяет достигнуть коэффициента снижения объема вплоть до 100 в зависимости от плотности отходов[13].

Прессование – высокотехнологичная и надежная технология уменьшения объема, которая используется при переработке РАО, главным образом, при обращении с твердыми промышленными отходами низкой активности. Некоторые страны (Германия, Великобритания и США) используют эту технологию для уменьшения объема отходов средней активности. Диапазон установок для прессования может быть достаточно широк: от систем уплотнения с низким давлением (~ 5 тонн или выше) до прессов с силой давления более 1000 тонн. Коэффициенты уменьшения объема обычно находятся между 3 и 10, в зависимости от обрабатываемых отходов.

Уплотнение с низкой силой давления осуществляется на гидравлических или пневматических прессах для сжатия отходов в подходящие для этого контейнеры.

Обезвоживание и кристаллизацию применяют для жидких, высокоактивных отходов переводом их в твердую фазу после временной выдержки.

Следующей стадией переработки РАО является кондиционирование – это процесс, при котором создается устойчивая твердая форма отходов, пригодных для временного хранения и захоронения. Основная цель процесса кондиционирования - снижение общего объема отходов при одновременной фиксации радионуклидов, позволяющей максимально уменьшить распространение радиоактивных продуктов на последующих стадиях обращения с РАО.

Кондиционирование радиоактивных отходов, которое представляет собой включение отходов в связывающие основы (матрицы), затвердевающие в виде блоков внутри наружных контейнеров, обеспечивает необходимую безопасность для временного или постоянного захоронения и транспортирования.

Для локализации РАО используются различные материалы: цемент, битум, органические полимеры и др. Материалы выбираются с учетом вида радиоактивных отходов (изотопный состав, удельная активность), химических и физических свойств отходов. Кроме того, материалы должны быть относительно просты в технологической обработке, их использование не должно приводить к значительному увеличению объема конечного продукта по сравнению с исходным объемом. При выборе материала матриц должны приниматься во внимание также наличие его промышленного производства и связанные с этим экономические вопросы. Материалы, используемые в качестве матриц, должны обеспечивать однородность локализованных форм отходов, устойчивость к выщелачиваемому действию воды и водонепроницаемость, механическую прочность, устойчивость к воздействию внешних факторов (химических, биологических и других), термическую и радиационную устойчивость, стабильность в процессе хранения.

Следующим этапом в системе обращения с радиоактивными отходами является транспортировка радиоактивных материалов с места их возникновения до места хранения или захоронения (либо до места дальнейшей переработки).

Радиоактивные материалы по ГОСТу 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» относятся к 7 классу опасности. Их объем от общего количества перевозимых опасных грузов колеблется от 1 до 10% в год [14]. Перечень перевозимых радиоактивны материалов достаточно широк: от руды до радиоактивных материалов, применяемых в медицине. Согласно данным Российского атомного сообщества, во всем мире в основном перевозятся радиоактивные материалы, использующиеся в медицине (67%) [15]. Объем транспортируемых радиоактивных материалов, применяемых в промышленности, составляет 20%, используемых в атомной энергетике – около 13% [15].

В Российской Федерации перевозка радиоактивных материалов осуществляется на всех видах транспорта – железнодорожным, водным, воздушным, автомобильным [15].

Для обеспечения и контроля безопасности при перевозках радиоактивных материалов в России действует комплексная система государственных органов и соответствующих инструментов управления.

Функции надзора и контроля за обеспечением безопасности при перевозках РМ выполняют госкорпорация «Росатом», МПР России (в состав которого входит Ростехнадзор), Минздравсоцразвития России (в его состав входят ФМБА России и Роспотребнадзор), МЧС России, Минтранс России, МВД России, ФСБ России, Минобороны России (в области перевозок РМ в оборонных целях), ФТС России [16]

Роль государственного компетентного органа (ГКО) по обеспечению безопасности, в том числе при международных перевозках, с самого начала выполняли Минсредмаш и его правопреемники (в настоящее время — ГК «Росатом»).

Требования по обеспечению радиационной безопасности при транспортировке радиоактивных материалов изложены в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии – Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов НП-053-04. Данные правила по физической защите при перевозках РМ содержат более жесткие требования, чем в рекомендациях МАГАТЭ (Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов), инструкциях и других документах по перевозке опасных грузов международных организаций (Международной морской организации, Международной организации гражданской авиации), европейских соглашениях [16, 17].

Этими правилами регламентированы требования по безопасности перевозки радиоактивных материалов [16]:

* к грузу и условиям перевозки с точки зрения ядерной и радиационной безопасности;
* к грузу и условиям перевозки с точки зрения обеспечения физической защиты или сохранности груза;
* к организации и обеспечению безопасности движения;
* к обеспечению аварийной готовности и реагированию в случае аварии.

По правилам безопасной перевозки радиоактивных материалов, последние должны быть при транспортировании помещены в специальные радиационно-защитные упаковки (транспортный радиационно-защитный упаковочный комплект с радиоактивным содержимым, подготовленный к транспортированию), которая включает в себя – защитный контейнер (внутренняя часть транспортного радиационно-защитного упаковочного комплекта, выполненная в виде сосуда с радиационной защитой для размещения в нем радиоактивных веществ в потребительской таре, пеналах, чехлах или без них), охранную тару (Внешняя часть транспортного радиационно-защитного упаковочного комплекта, предназначенная для обеспечения работоспособного состояния и надежности других составных частей, а также для предотвращения непосредственного их контакта с транспортными средствами и объектами окружающей среды во время транспортирования), а также систем герметизация, в состав которой могут входить потребительская тара, пенал, уплотняющие устройства крышки (пробки) с гнездом, жестяная банка, капсула радиоактивного вещества особого вида, вспомогательные упаковочные средства и другие герметичные устройства [18]

Завершающей стадией системы обращения с РАО является их долгосрочное хранение или захоронение, которые будут описаны ниже.

Используя термины хранение и захоронение радиоактивных отходов, чаще всего подразумевают долгосрочную изоляцию данных отходов от окружающей среды. Различие данных понятий заключается лишь в одном – при захоронении отходы размещаются без возможности и намерений извлечения, а при хранении – с теоретически возможным извлечением. В этом и состоит современный подход, при котором долгосрочная изоляция радиоактивных отходов предусматривает создание сооружений, в которых отходы размещаются без намерения извлечения, но с такой возможностью[2].

Производитель РАО

Образование РАО

Специализированные

Ор г аина з иции

Сбор и сортировка РАО

Низкоактивные отходы

Высокоактивные отходы

Среднеактивные отходы

Захоронение (для отходов урановой промышленности на месте добычи)

Кондиционирование (концентрирование, отверждение, сжигание, прессование, дезактивация, упаковка или контейнеризация)

Временное хранение (сухое хранение или водное хранение для ОЯТ)

Переработка на спец.хим.комбинатах

Транспортировка

Долговременное хранение в наземных сооружениях, в приповерхностных сооружениях

Захоронение в приповерхностных сооружениях, в геологических формациях

Национальный оператор

Рисунок 3. Схема обращения с РАО [10]

В современной законодательной базе РФ прописаны следующие способы захоронения радиоактивных отходов [19]:

* приповерхностное захоронение РАО – захоронение РАО в сооружениях, размещаемых выше поверхности земли, на одном уровне с поверхностью земли или ниже поверхности земли на глубине до ста метров от поверхности земли. В приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) допустимо захоронение удаляемых РАО, относящихся к классам 3, 4 и 6 (рисунок 1);
* глубинное захоронение РАО – захоронение РАО в сооружениях, размещаемых на глубине более ста метров от поверхности земли. Удаляемые РАО, относящиеся к классам 1 и 2 (рисунок 1), подлежат захоронению в глубинных пунктах захоронения;
* глубинное захоронение жидких РАО – захоронение жидких РАО (далее – ЖРО) в глубокозалегающих пластах-коллекторах на глубине нескольких сотен метров в пределах границ горного отвода путем нагнетания через нагнетательные скважины. В пунктах глубинного захоронения ЖРО допустимо осуществлять захоронение удаляемых ЖРО, относящихся к классу 5 (рисунок 1).

Согласно требованиям НП-055-14, при захоронении РАО должны соблюдаться 4 основных принципа обеспечения безопасности [19]:

* оптимизации – радиационное воздействие, связанное с захоронением РАО, должно поддерживаться на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов;
* многобарьерности – долговременная безопасность захоронения РАО в период после закрытия ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должна обеспечиваться применением системы барьеров безопасности на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду; нарушение целостности одного из барьеров безопасности или вероятное внешнее событие природного или техногенного происхождения не должны приводить к снижению уровня долговременной безопасности системы захоронения РАО;
* защиты будущих поколений – прогнозируемые уровни облучения будущих поколений, обусловленные захоронением РАО, не должны превышать допустимых уровней облучения населения, установленных нормативными правовыми актами;
* невозложения чрезмерного бремени на будущие поколения – захоронение РАО должно осуществляться таким образом, чтобы не возлагать на будущие поколения необоснованное бремя, связанное с необходимостью обеспечения безопасности при обращении с РАО.

Понимание схемы обращения является ключевым звеном на этапе выбора варианта переработки радиоактивных отходов и метода хранения или захоронения. Для полной картины необходимо изучить образующиеся на территории Ленинградской области РАО.

В данном параграфе была решена первая поставленная задача, а именно проанализированы существующие подходы к классификации РАО и дана характеристика схемы обращения с РАО. В качестве используемой в данной работе классификации была выбрана ОСПОРБ – 99(2010).

**1.3 Структура радиоактивных отходов в Ленинградской области**

В Ленинградской области сосредоточены предприятия, использующие ядерные материалы и технологии и, следовательно, являющиеся источниками образования радиоактивных отходов. Самым крупным из данных предприятий является расположенная в пятидесяти километрах от южных границ Санкт-Петербурга, в городе Сосновый бор, крупнейшая атомная электростанция на Балтике - Ленинградская атомная электростанция (ЛАЭС). ЛАЭС состоит из четырех блоков типа РБМК-1000. Установленная мощность станции – 4000 МВт [20].

Неподалеку от ЛАЭС строиться ЛАЭС-2. Сооружение энергоблоков ЛАЭС-2 осуществляется в рамках «Программы деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» на долгосрочный период (2009-2015 годы)», утвержденной постановлением Правительства РФ от 20.09.2008г. №705, Ввод энергоблока в опытно-промышленную эксплуатацию планируется произвести в 2018 год [21].

Кроме ЛАЭС и ЛАЭС-2 в Санкт-Петербурге и Ленинградской области работают следующие предприятия, являющиеся источником радиационной опасности:

* НИТИ им. А.П. Александрова;
* ПИЯФ им. Б.П. Константинова;
* ЛОФ «СЗТО ФГУП «РосРАО»;
* ЗАО «Экомет-С»;
* **Радиохимическое производство РНЦ «Прикладная химия»;**
* **Радиевый институт им. Хлопина;**
* Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова».

По состоянию на 2013 г. объем накопленных РАО на территории ЛО составляет примерно 1,6·105 м3, а их суммарная бета-активность 2,1·1016Бк. Основной объем РАО находятся на территории г. Сосновый Бор [22].

К сожалению, выяснить вклад каждого предприятия из списка, приведенного выше, нет возможности. Исторически неизбежная закрытость атомной отрасли с момента ее возникновения (почти 75 лет назад) и раннего развития, и в наши дни продолжает быть актуальной. Получить достоверную информацию об атомной отрасли практически невозможно. В последний год предприятия государственной корпорации «Росатом» стали публиковать годовые экологические отчеты, в которых приведены основные сведения о деятельности предприятия. В данных отчетах приведены сведения, которые относятся к больше к сфере экономики и хозяйствования, нежели чем к экологической сфере. Стоит отметить, что подобные отчеты есть далеко не у всех предприятий, на официальном сайте «Росатома» были вывешены отчеты следующих организаций:

* НИТИ им. А.П. Александрова
* ФГУП «Национальный оператор РАО»
* Ленинградская АЭС
* ФГУП «РосРАО»
* Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова».

Во все остальные перечисленные выше предприятия для получения достоверной информации о радиоактивных отходах, образующихся на территории Ленинградской области, было направлено письмо следующего содержания:

«Уважаемые господа,

я, Логинова Арина Олеговна, являюсь магистранткой второго курса Санкт-Петербургского Государственного университета по направлению геоэкология и рациональное природопользование. При написании выпускной квалификационной работы (Сравнение воздействия на окружающую среду методов битумирования и цементирования радиоактивных отходов) я планирую дать рекомендацию по выбору приоритетной технологии по отверждению радиоактивных отходов, имеющихся в Санкт-Петербурге и Ленинградской области.

В ходе исследования мы столкнулись с проблемой определения количественного и качественного (по агрегатному состоянию, и бета-активности) состава радиоактивных отходов, образующихся на территории Ленинградской области. В связи с этим я и обращаюсь к Вам.

Нам бы хотелось, согласно (статьям 41, п.3, и 42 Конституции РФ и Статье 7, Закона РФ О государственной тайне «…Не подлежат отнесению к государственной тайне и засекречиванию сведения: …; о состоянии экологии, … »,  получить у вас информацию:

- об образующихся на вашем предприятии радиоактивных отходах, а именно: примерное количество образованных РАО за последние 5 – 10 лет, качественные их характеристики (агрегатное состояние, бета-активности);

- о методах переработки применяемый на вашем предприятии;

- о способах хранения РАО на вашем предприятии (если происходит передача сторонним организациям на хранение, то каким). Буду премного благодарна вам, за ответы на эти вопросы»

Как и следовало ожидать, на момент 22.05 мы не получили ответа ни от одной из организаций.

В результате, основными источниками информации о качественных и количественных характеристиках радиоактивных отходов на территории Ленинградской области послужили следующие годовые отчеты подразделений государственной корпорации «Росатом»:

* Отчет по экологической безопасности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» за 2015,2014, 2013 год. Сосновый Бор, 2016 г;
* Отчет по экологической безопасности ФГУП «РосРАО» за 2015, 2014, 2013 г;
* Отчет по экологической безопасности Росэнергоатома «Ленинградская АЭС» за 2015 г;
* Отчет по экологической безопасности филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО»;
* Отчет по экологической безопасности ФГУП «НО РАО»;
* Годовой публичный отчет государственной корпорации «Росатом» за 2015, 2014, 2013 года.
* Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду. «Пункт захоронения радиоактивных отходов низкой и средней активности в районе расположения Ленинградского отделения филиала «Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО». Москва, 2013 г.

Анализ перечисленных документов позволил получить следующую информацию, связанную с образующимся на территории Ленинградской области радиоактивным отходам.

Образующиеся на Ленинградской АЭС твердые радиоактивные отходы (ТРО) – отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, оборудование, использованные средства индивидуальной защиты и другие – сортируются по видам и активностям, загружаются в контейнеры и транспортируются на специально оборудованном транспорте в места их переработки и хранения.

Металлические отходы с низкой активностью передаются на переплавку в ЗАО «Экомет-С». Горючие и прессуемые радиоактивные отходы отправляются на переработку на Комплекс по переработке ТРО, которые после измельчения на станке рубки размещаются в хранилища ТРО, расположенные на минусовых отметках реакторных блоков. Неперерабатываемые ТРО затариваются в соответствующие упаковки и отправляются на хранение в хранилище твердых радиоактивных отходов (ХТРО) Ленинградской АЭС[94].

Отвержденные ранее ЖРО в виде битумного компаунда хранятся в специализированном наземном сооружении. Битумирование кубового остатка в 2015 году на Ленинградской АЭС не проводилось. Установка битумирования выведена в резерв[94].

С 2014 года на Ленинградской АЭС введен в эксплуатацию Комплекс по переработке твердых радиоактивных отходов. В состав Комплекса входят установки сортировки, прессования, сжигания, системы транспортно-технологических операций, дезактивации оборудования и другие. Комплекс по переработке ТРО оснащен оборудованием фирмы «Nukem» (Германия). Объемы образования ТРО 2015 года составляют 120 % от объемов 2014 года. Увеличение объемов образования ТРО в отчетном году связано с большим объемом работ, выполненных в ходе ремонтов энергоблоков №№1-4. Сбор и удаление жидких радиоактивных отходов (ЖРО) осуществляется системой специальной канализации, через которую они направляются на переработку на установках специальной водоочистки. ЖРО в виде кубового остатка и пульп поступают по трубопроводам на хранение в емкости комплекса переработки отходов[94].

В настоящий момент на ЛАЭС не осуществляют переработку ЖРО, данный процесс будет возобновлен после ввода в эксплуатацию на Ленинградской АЭС комплексов по переработке ЖРО гомогенного и гетерогенного составов[94].

Поэтому на данный момент времени переработку РАО на территории ЛО осуществляют в основном 2 предприятия: Ленинградское отделение филиала «Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО» (обращение с жидкими и твердыми радиоактивными отходами низкой и средней активности, дезактивация одежды, временное хранения РАО) и ЗАО «Экомет-С» (обращение с металлическими отходами, загрязненными радиоактивными веществами).

На сайте «Экомет-С» указано, что суммарная проектная мощность комплекса по обращению с металлическими отходами, загрязненными радиоактивными веществами с низкой активностью (до 0,3 мЗв/ч) - до 5000 тонн/год.  За время существования предприятия на нем было переработано более 2,5·104 тонн (более 4·104 м3) – удельный вес составляет 0,625 т/м3. металлических отходов, загрязненными радиоактивными веществами, поступивших, в основном, с предприятий атомной энергетики и промышленности, а также объектов нефтегазового комплекса [23]. Например, металлические отходы с ЛАЭС передаются в ЗАО «Экомет-С» на переплавку [24], но информации о количестве передаваемых на переработку отходов нет.

В отчете по экологической безопасности предприятия ЛОФ «СЗТО ФГУП «РосРАО» за 2015 г. указано, что на территории предприятия накоплено 67 016 м3 радиоактивных отходов, что составляет 1,2 % от радиоактивных отходов, накопленных на территории РФ на период до 2015 г. Общая активность накопленных в ЛОФ «СЗТО ФГУП «РосРАО» составляет 1,99·1016Бк [26], из них:

* твердые радиоактивные отходы составляют около 64 553 м3 общей активностью 1,99·1016Бк;
* жидкие радиоактивные отходы составляют около 2 463 м3 общей активностью 3,22·1013 Бк.

Более подробно объем накопленных отходов разобран в таблице 4.

В отчете по экологической безопасности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» указано, что на данном предприятии, которое находится в г. Сосновый Бор, за год образуется радиоактивных отходов (как твердых, так и жидких) общим объёмом 238 м3, из которых 163,5 м3 переданы на кондиционирование в ЛО СЗТО ФГУП «РосРАО» [27].

Для понимания отношения образующихся и перерабатываемых РАО на территории Российской Федерации и Ленинградской области приведем таблицу 3.

Таблица 3. Соотношение образующихся и накопленных радиоактивных отходов в РФ и Ленинградской области.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Критерий сравнения | Российская Федерация | С.-Петербург и Ленинградская область | Процентное соотношение, % |
| Количество накопленных РАО на 2015 год/ относящихся к «ядерному наследию», м3 | 5,6·108/5,5·108 [4] | 1,6·105/нет данных [22] | 0,02/нет данных |
| Образующихся РАО за год, м3  2015  2014 | 1,8·106 [4]  2,47·106[4] | 3,9·104 [25,27]  2,6·104 [25] | 2  1,05 |
| Переработанных РАО за 2015 год, м3 | 9,25.105 [4] | 8,6·104 [22] | 9,3 |

Из данной таблицы видно, что на территории Ленинградской области в 2015 году образовалось 2 %, а в 2014 году – 1% от общего объема образующихся в РФ радиоактивных отходов за те же года. В 2015 году на территории Ленинградской области было переработано 9,3% от общего объема перерабатываемых отходов в Российской Федерации.

Таблица 4. Накопленные радиоактивные отходы в пункте хранения Ленинградской области [26]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование РАО | Вид РАО | Классификация | Опасные свойства отхода, виды работ с РАО | Объемы РАО, поступающих за год |
| Жидкие РАО | Удаляемые, не содержащие ядерные материалы, долгоживущие | Низкоактивные радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с удельной активностью:  - до 104 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов  - до 103 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) радиоактивных отходов  - до 102 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов  - до 101 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов | Опасны при попадании в пищевые цепочки, контакте и нахождении вблизи.  ПР+Т+П+Х\* | 2 000 м3 |
| Среднеактивные радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с удельной активностью:  - от 104 до 108 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов  - от 103 до 107 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) радиоактивных отходов  - от 102 до 106 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов  - от 101 до 105 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов | Опасны при попадании в пищевые цепочки, контакте и нахождении вблизи.  ПР+Т+П+Х\* | 400 м3 |
| Твердые РАО | Удаляемые, долгоживущие, не содержащие ядерные материалы | Ранее накопленные радиоактивные отходы в период с 1962г. Определение категории радиоактивных отходов затруднено. | Опасны при контакте и нахождении вблизи.  Х+П\* | 62 440  м3 |
| Среднеактивные РАО  - от 108 до 1011 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов  - от 104 до 107 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) РАО  -от 103 до 106 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов  - от 102 до 105 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов | Опасны при контакте и нахождении вблизи.  ПР+Т+П+К+Х\* | 200 м3 |
| Низкоактивные РАО  -от 107 до 108 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов  -от 103 до 104 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) РАО  - от 102 до 103 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) РАО  - от 101 до 102 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов | Опасны при контакте и нахождении вблизи.  ПР+Т+П+К+Х\* | 500 м3 |
| Очень низкоактивным РАО  - до 107 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов  - до 103 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) РАО  - до 102 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов  - до 101 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов | Опасны при контакте и нахождении вблизи.  ПР+Т+П+К+Х\* | 500 м3 |

\* ПР - прием, П - переработка, К-кондиционирование, Т - транспортирование, Х – хранение.

Для определения степени воздействия на окружающую среду двух методов переработки радиоактивных отходов необходимо дать характеристику данных методов.

В данном параграфе была решена вторая поставленная задача, а именно изучили характер и структуру РАО, образующихся на территории Ленинградской области.

Анализ отчетной документации показал, что объем перерабатываемых на территории Ленинградской области радиоактивных отходов составляет 3 600 м3 , большая часть которого приходится на жидкие отходы активностью от 101 кБк/кг до до 108 кБк/кг (66,7%).

Для получения данных воздействия на окружающую среду методов цементирования и битумирования необходимо изучить характеристики данных методы.

**Глава 2 Битумирование и цементирование РАО**

**2.1 Воздействие битумирования радиоактивных отходов на окружающую среду**

Под битумированием понимают включение РАО в твёрдый инертный материал на основе асфальтенов (асфальтены – твердые аморфные вещества, окрашенные в темный цвет, – от темно-бурого до черного. Асфальтеновые молекулы представляют собой полициклическую ароматическую сильно конденсированную систему с короткими алифатическими цепями в качестве заместителей ароматического ядра) и битумов. Метод битумирования основан на смешении жидких или пульпообразных РАО (кубовые остатки (смесь, состоящая из натриевых солей синтетических жирных кислот и неомыляемых продуктов (спирты, углеводороды, продукты уплотнения с солесодержанием от 200 до 500 г/л) от упаривания, шламы и осадки различного происхождения [13]) с горячим битумом и одновременным обезвоживанием.

Битум можно отнести к самым применяемым в промышленности органическим вяжущим веществам.

Состав битумов по элементам варьируется в пределах: С (70 – 80%), H2 (10 – 15%), S (2 – 9%), O2 (1 – 5%), N2 (0 – 2%) [13]. Эти элементы находятся в битуме в виде углеводородов и их соединений с серой, кислородом и азотом. Химический состав битумов весьма сложен. Например, в них могут находиться предельные углеводороды от С9Н20 до С30Н62. Все многообразные соединения, образующие битум, можно объединить в три основные группы:

* твердая часть (это высокомолекулярные углеводороды и их производные с молекулярной массой 1000-5000, плотностью более 1, объединенные общим названием асфальтены. В состав битумов могут входить также твердые углеводороды – парафины);
* смолы (это аморфные вещества темно-коричневого цвета с молекулярной массой 500-1000, плотностью около 1);
* масла (это различные углеводороды с молекулярной массой 100-500, плотностью менее 1).

По своему строению битум представляет коллоидную систему, в которой диспергированы асфальтены, а дисперсионной средой являются смолы и масла. Асфальтены битума, диспергированные в виде частиц размером 18-20 мкм, являются ядрами, каждое из них окружено оболочкой убывающей плотности – от тяжелых смол к маслам [28].

Свойства битума, как дисперсной системы, определяются соотношением входящих в него составных частей: масел, смол и асфальтенов. Повышение содержания асфальтенов и смол влечет за собой возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума. Наоборот, масла, частично растворяющие смолы, делают битум мягким и легкоплавким. Снижение молекулярной массы масел и смол также повышает пластичность битума.

Парафин, содержащийся в нефтяных битумах, ухудшает их свойства, повышает хрупкость при пониженных температурах. Поэтому стремятся к тому, чтобы содержание парафина в битуме не превышало 5% [28].

Наиболее важным свойством является химическая стойкость битумов и битумных материалов к действию агрессивных веществ, вызывающих коррозию цементных бетонов, металлов и других строительных материалов. По данным Н. А. Мощанского, битумные материалы хорошо сопротивляются действию щелочей (с концентрацией до 45%), фосфорной кислоты (до 85%), а также серной (с концентрацией до 50%), соляной (до 25%) и уксусной (до 10%) кислот [28]. Менее стойки битумы в атмосфере, содержащей окислы азота, а также при действии концентрированных растворов кислот. Битум растворяется в органических растворителях. Благодаря своей химической стойкости и экономичности битумные материалы широко применяют для химической защиты железобетонных конструкций, стальных труб и др.

Физические свойства органических и неорганических вяжущих веществ, и материалов, изготовляемых на их основе, различны. Для органических веществ, в отличие от минеральных, характерны гидрофобность, атмосферостойкость, растворимость в органических растворителях, повышенная деформативность, способность размягчаться при нагревании вплоть до полного расплавления. Эти свойства обусловили применение органических вяжущих для производства кровельных, гидроизоляционных и антикоррозионных материалов, а также их широкое распространение в гидротехническом и дорожном строительстве [29].

Плотность битумов в зависимости от группового состава колеблется в пределах от 0,8 до 1,3 г/см3. Теплопроводность характерна для аморфных веществ и составляет 0,5-0,6 Вт/(м·°С); теплоемкость – 1,8-1,97 кДж/(кг·К) [29]. Коэффициент объемного теплового расширения при 25°С находится в пределах от 5·10-4 до 8·10-4°С [29], причем более вязкие битумы имеют больший коэффициент расширения. При пониженных температурах – около 2·104°С. Устойчивость при нагревании характеризуется [28]:

1) потерей массы при нагревании пробы битума при 160°С в течение 5 ч (не более 1%);

2) температурой вспышки (230-240°С – в зависимости от марки).

Водостойкость характеризуется содержанием водорастворимых соединений (в битуме не более 0,2-0,3% по массе).

Старение – процесс медленного изменения состава и свойств битума, сопровождающийся повышением хрупкости и снижением гидрофобности. Ускоряется под действием солнечного света и кислорода воздуха вследствие возрастания количества твердых хрупких составляющих за счет уменьшения содержания смолистых веществ и масел [30].

Реологические свойства (реология - раздел механики, занимающийся изучением текучести жидких и газообразных веществ, а также процессов, связанных с остаточными деформациями твердых и твердоподобных тел) битума зависят от группового состава и строения. Жидкие битумы, имеющие структуру типа золь, ведут себя как жидкости, течение которых подчиняется закону Ньютона [30]. Твердые битумы, имеющие структуру типа гель, относятся к вязко-упругим материалам, так как при приложении к ним нагрузки одновременно возникает упругая (обратимая) и пластическая (необратимая) составляющие деформации.

Марку битума определяют твердостью, температурой размягчения и растяжимостью [29].

Твердость находят по глубине проникания в битум иглы (в десятых долях миллиметра).

Температуру размягчения определяют на приборе “кольцо и шар”, помещаемом в сосуд с водой. Она соответствует той температуре нагреваемой воды, при которой металлический шарик под действием собственной массы проходит через кольцо, заполненное испытуемым битумом.

Растяжимость характеризуется абсолютным удлинением (см) образца битума (“восьмерки”) при температуре 25°С, определяемым на приборе –дуктилометр [29].

Из этого можно сделать вывод, что битум подходят в качестве вяжущего материала для отверждения жидких радиоактивных отходов.

Для улучшения свойств битумно-солевого компаунда в него предварительно или при битумировании вводят различные добавки, повышающие надёжность.

Битум благодаря своей термопластичности позволяет при нагревании успешно включать в себя концентраты с получением гомогенного продукта. Гидростойкость битума обеспечивает довольно надежную гидроизоляцию включенных компонентов. Отмечается также меньшая чувствительность битума к составу отверждаемого продукта, чем у связующих, включение отходов в которые возможно при комнатной температуре. Также битумы привлекают внимание такими положительными качествами, как непроницаемость, пластичность, достаточная химическая инертность, невысокая стоимость. Предельные величины включения отходов зависят от их состава [30].

Концентраты ЖРО (солевой раствор, получаемый в процессе упаривания жидких радиоактивных отходов), полученные в результате их переработки, должны храниться в течение нескольких десятков лет в изоляции от окружающей среды. Необходимость изоляции РАО от окружающей среды в течение длительного времени и стремление сократить срок обслуживания мест хранения привели к необходимости перевода радионуклидов в твердые формы. Концентраты, полученные в результате очистки САО и НАО, представляют собой шламы после фильтрации и химической обработки, отработавшие ионообменные смолы, кубовые остатки после упаривания.

Битумирование продуктов переработки ЖРО нашло широкое применение. Это обусловлено универсальностью битума как связующего ингредиента, в который могут быть включены практически все продукты переработки ЖРО, хорошими характеристиками получаемого битумного компаунда и относительной простотой аппаратурного оформления технологического процесса.

Для включения концентратов ЖРО, которые имеют целый ряд ограничений по химическому составу, в битумную матрицу должны соблюдаться следующие условия [13]:

* рН раствора должен быть в интервале 7-9;
* коррозионно-агрессивные анионы, такие как, фториды (в виде CaF2), должны быть переведены в осадок;
* содержание “органики” (типа трибутилфосфат – трибутиловый эфир фосфорной кислоты (С4Н9О)3Р=О, относится к органическим фосфатам.) должно быть <1 вес. %;
* концентрация каталитических соединений (хлориды железа и алюминия) не должна превышать 1%;
* карбонаты и сульфаты натрия, являющиеся гигроскопичными соединениями, необходимо перевести в соответствующие нерастворимые соединения бария или кальция.

Также ограничивается степень включения в битумную смесь гигроскопичных соединений – ионообменных смол (не более 20-30 %), кристаллогидратов (например, тетрабората натрия не более 20 %) [13]. Фильтроматериалы типа перлита, датолита при включении в битум более 10 % приводят к затвердению битума. Однако общую степень включения в битум можно увеличить до 40-50 % введением в смесь солевого наполнителя, например, нитрата или сульфата натрия. Не рекомендуется подвергать битумированию кислые растворы с большим содержанием нитратов железа и алюминия, которые могут окислить битум, изменяя его термопластические свойства. При битумировании сильнощелочных растворов со значением рН более 12 может происходить омыление органических соединений, входящих в состав битума, что уменьшает его водоустойчивость [31].

Исследования влияния радиации на свойства битумированных отходов показали, что при мощности дозы γ-излучения не более 0,1 Гр/с у поверхности отхода отсутствует разложение битума, не изменяется фракционный состав и не наблюдается газовыделение при хранении[20].

Технологические процессы битумирования радиоактивных отходов могут быть подразделены на три группы. Первая группа включает процессы, разработанные в Бельгии, Великобритании, бывшем СССР и ФРГ и предусматривающие смешение жидких и твердых радиоактивных отходов с расплавленным битумом при температуре 160 - 230°С с одновременным выпариванием воды и возгонкой легколетучих составляющих из нагретого слоя битума.

Вторая группа процессов битумирования основана на технологии, разработанной в США, и включает смешение отходов с битумной эмульсией при нормальной температуре, нагрев полученной смеси для разрушения эмульсии и отгонки воды и легколетучих органических составляющих.

Третья группа представлена процессом, разработанным во Франции и включающим операции смешения шламов, реагентов (поверхностно- 249 активных веществ) и битума, отделения выделяющейся из битумного материала воды с последующим полным обезвоживанием битумной массы [32].

В процессе проведенных опытно-промышленных испытаний по обращению с низкоактивными и среднеактивными ЖРО в настоящее время применяется три основных типа установок по битумированию ЖРО [31]:

1. Шнековый смеситель (экструдер) с обогревом паром или органическим теплоносителем, в который непрерывно подаются битум и отходы и непрерывно выгружается готовый продукт. Аппарат не предназначен для упаривания пенящихся растворов и имеет недостаточно развитую греющую поверхность. Шнековый смеситель рационально использовать для предварительного обезвоживания отходов или пульп.

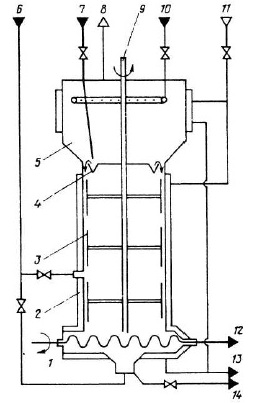


Рисунок 4.  Схема битуматора

1 – винтовой экструдер; 2 – паровая рубашка; 3 – скребок; 4 – вращающийся диск: 5 – корпус битуматора; 6 – битум; 7 – вход исходного раствора; 8 – парогазовая смесь; 9 – вал; 10 – моющие растворы; 11- греющий пар; 12 – битумная смесь на захоронение; 13 – конденсат греющего пара; 14 – сток в спец.канализацию [33]

2. Пленочный роторный испаритель позволяет в одном аппарате осуществлять удаление влаги и битумирование. Теплоносителем служит греющий пар, который имеет ограниченные температурные параметры и не допускает температуру внутри аппарата выше 230-240 °С

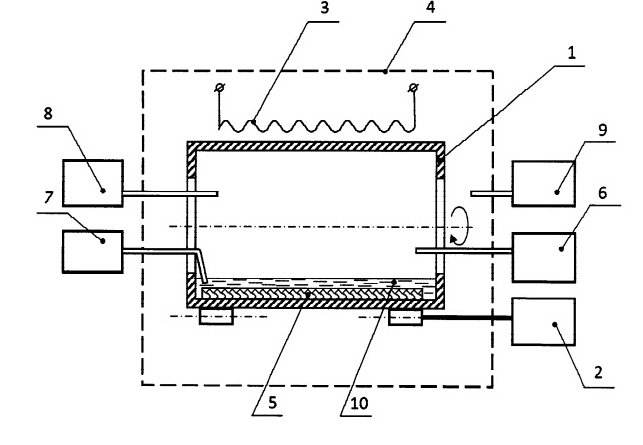


Рисунок 5. Схема пленочного роторного испарителя

1 – барабан; 2 – привод вращения; 3 – нагревательный элемент; 4 – корпус; 5 –приспособление для очистки от отложений; 6 – система дозированной подачи раствора; 7 – система выгрузки и сбора концентрированного продукта; 8 – система сбора, конденсирования паров и отвода конденсата; 9 – система создания разряжения; 10 –уровень раствора [33]

3. Установки периодического действия с внутренними электронагревателями, в котором на порцию горячего битума подаются при постоянном перемешивании механической мешалкой отходы. Недостатки аппарата – малая производительность (не более 70 л/ч), возможность отложения битумных солевых наростов на стенках аппарата, электроподогрев, не исключающий перегрев свыше температуры 200 °С.

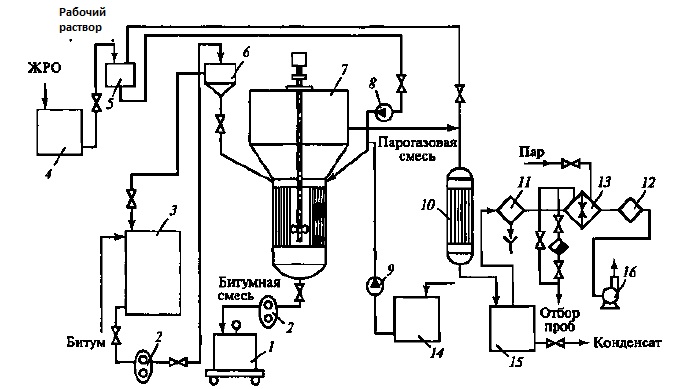


Рисунок 6. Установка битумирования ЖРО периодического действия

1 – контейнер-упаковка; 2 – битумный насос; 3 – емкость чистого битума; 4 – емкость ЖРО; 5 –дозатор раствора; б – дозатор битума; 7 – битуматор ДБ-100; 8 – насос-дозатор; 9 – насос; 10 – конденсатор; 11, 12 – фильтры грубой и тонкой очистки; 13 – теплообменник; 14, 15 – баки промывочного раствора и конденсата; 16 – вентиляционная установка [34]

Конечные операции на всех установках битумирования одинаковы: затаривание битумной массы, хранение или захоронение контейнеров с продуктами. Для захоронения радиоактивных отходов используют искусственные битумы, получаемые окислением гудрона или других продуктов перегонки нефти кислородом.

К недостаткам метода битумирования можно отнести следующее:

* неустойчивость битумных блоков при температуре свыше 350 °С;
* увеличение содержания солей в битумной смеси может вызвать ее расслаивание в разогретом состоянии при транспортировке или в начальном периоде хранения%;
* сравнительно низкая теплопроводность битумных продуктов (0,5–0,6 Вт/(м⋅°С)) заставляет уменьшать объемную активность поступающих на битумирование отходов до (3,7-37) -1010 Бк/дм3, хотя чаще концентрирование отходов лимитируется солесодержанием, а не активностью [30];
* битумные компаунды подвержены также биологическому разращению со стороны почвенных бактерий, которое возможно при хранении на грунте, при хранении в местах с малоплодородной почвой и глубоким залеганием грунтовых вод микробиологические повреждения не наблюдаются, как и при хранении битумных блоков в глинистом грунте [35].

Эти факторы налагают определенные ограничения на хранение отвержденных РАО, при несоблюдении которых может спровоцировать разрушение битумных блоков и высвобождение хранящихся в них радионуклидов. Еще одним недостатком использования метода битумирования является горючесть битумного компаунда, что является причиной удорожания хранения отвержденных ЖРО.

Технологические параметры процесса битумирования должны обеспечивать получение битумного компаунда с заданными характеристиками (наполнение по сухому остатку, водоустойчивость, влажность, вязкость), а также пожаро- и взрывобезопасность при его получении и хранении. Рекомендуются следующие основные параметры [36]:

* удельная активность ЖРО не более 3,7 – 106 Бк/л (10~ Ки/л);
* температура процесса битумирования – 130-160 °С;
* температура процесса при битумировании пульп ионообменных смол – не более 40 °С;
* наполнение (по массе) битумного компаунда по солям – 50 %, по ионообменным смолам – 40 %.

Во избежание ухудшения качества компаунда содержание (по массе) в нем боратов натрия не должно превышать 20 %, мыла – 4 %. По этой же причине не рекомендуется битумировать ЖРО с рН > 12; температура выгрузки битумного компаунда должна составлять 100-130 °С, что связано с необходимостью обеспечить требуемые вязкость и гомогенность [36].

Для отверждения кубового остатка обычно используется режим непрерывного битумирования.

С увеличением жесткости битумов при равном солевом наполнении водоустойчивость компаундов ухудшается. Это связано с тем, что жесткие битумы, характеризующиеся более высокой температурой размягчения, не могут создать прочную защитную пленку на минеральных частицах при их высокой концентрации. Поэтому в качестве связующего целесообразно использовать битумы с температурой размягчения 40-45 °С, какими являются битумы марок БНК 45/180, БНД 60/90, БНД 90/130, а также возможно использование битума БН-111. Основные характеристики битумов приведены в табл.4.

Таблица 4. Характеристики битумов [34]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка битума | Температура размягчения, °С | Потеря массы  при 160 °С,% | Температура  вспышки, °С | Фракционный состав  (по массе), % |
| БНК45/180 | 42 | 1,0 | 240 | 67 (масла), 21,6 (смолы), 10,7 (асфальтены) |
| БНД 90/130 | 40 | 1,0 | 200 | 59 (масла), 22 (смолы), 19 (асфальтены) |
| БНД 60/90 | 47 | 1,0 | 200 | 59 (масла), 22 (смолы), 19 (асфальтены) |

Результаты исследования метода битумирования радиоактивных отходов показали, что данный процесс должен соответствовать определенным условиям:

1) при выборе марки битума необходимо учитывать опасность загустения смеси при применении тугоплавких битумов и опасность расслоения при использовании мягких битумов (рекомендуется битум БН-111);

2) перемешивание битума с жидкими отходами должно осуществляться при температуре 120-130°С до практически полного обезвоживания. Температура ниже 120°С недопустима ввиду чрезмерного увеличения вязкости смеси и необходимости испарения солевого раствора. В конце процесса битумирования температура должна повышаться до 160°С для уменьшения вязкости перед сливом компаунда, а также для создания условий прочного связывания в битумной массе радиоизотопа стронция;

3) недопустимо появление зон с температурой выше 300°С во избежание бурных окислительно-восстановительных реакций между битумом и нитратом натрия;

4) процесс перемешивания битумной массы с кубовым остатком должен исключать центробежное движение массы в горизонтальной плоскости из-за возможности образования на стенках установки битумирования и нагревателя слоя компаунда, обогащенного нитратом натрия.

Основное воздействие, оказываемое битумированием РАО, происходит на атмосферный воздух. Именно поэтому в рамках данного исследования акцент был сделан на анализ негативного воздействия битумирования на атмосферный воздух.

На данный момент в Российской Федерации и в мире не существует методики расчета выброса отходящих газов от установок битумирования радиоактивных отходов. И измерить значения качественных и количественных характеристик отходящих газов возможно только методом прямого замера, т.е. на производстве с помощью газоанализаторов, приуроченных к трубе выброса. Но так как предприятия, на которых осуществляется данная технология, являются закрытыми, и автор не имеет доступа к таким объектам, то в нашем исследовании удалось оценить лишь качественные характеристики попадающих в атмосферный воздух веществ.

Это стало возможно благодаря использованию методики проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для асфальтобетонных заводов, т.к. там осуществляются операции с битумом сходные с теми, которые осуществляются во ФГУП «РосРАО».

При нормальной эксплуатации на предприятиях, перерабатывающих РАО методом битумирования, осуществляется следующие виды деятельности, связанные с использованием битума:

* хранение битума;
* нагрев;
* транспортировка.

Источники загрязнения воздушного бассейна подразделяются на источники выделения и источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Источники выделения загрязняющих веществ это: технологический агрегат, установка, устройство, аппарат и тому подобное, выделяющие в процессе эксплуатации, загрязняющие вещества.

Источниками выбросов загрязняющих веществ являются: труба, аэрационный фонарь, бункер, вентиляционная шахта, люк и тому подобные устройства, посредством которых осуществляется выброс загрязняющих веществ в атмосферу.

Выбросы загрязняющих веществ подразделяются на организованные и неорганизованные.

Организованными выбросами являются выбросы, отводимые от мест выделения системой газоотводов, что позволяет применять для их улавливания соответствующие установки.

Неорганизованными являются выбросы, возникающие за счет негерметичности технологического оборудования, газоотводных устройств, резервуаров, открытых мест пыления и испарения и т.д.

При обычной эксплуатации в атмосферу выделяются загрязняющие вещества, указанные в таблице 5.

Таблица 5. Вещества, попадающие в атмосферный воздух при битумировании РАО [37, 38, 39].

|  |  |
| --- | --- |
| Название (формула) соединений | Класс опасности |
| Свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец) | 1,2 |
| Азота оксиды (в пересчете на NО2) | 3 |
| Сажа | 3 |
| Ангидрид сернистый (серы диоксид – SO2) | 3 |
| Углерода оксид (СО) | 4 |
| Углеводороды предельные C12-C19 (в пересчете на суммарный органический углерод) | 4 |
| Пыль неорганическая (SiO2 > 70 %) динас и др. | 3 |
| Пыль неорганическая (SiO2 = 20-70 %) цемент, шамот и др. | 3 |
| Пыль неорганическая (SiO2 <20 %) известняк и др. | 3 |

Распределение веществ по источникам образования и выделения представлены в таблице 6.

Таблица 6. Распределение выделяемых в ходе битумировани в атмосферу веществ по источникам образования[37, 39]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Источники  выделения | Перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу | | | | | | | |
| Пыль  (неорга­ническая) | Оксиды | | | Углево­дороды | Сажа | Мазутная зола  (в пересчете на ванадий) | Свинец и его  неорганичес­кие соединения |
| серы | угле­рода | азота |
| Битумоплавиль­ная установка | - | + | + | + | + | - | - | - |
| Битумохрани­лище | - | - | - | - | + | - | - | - |
| Транспортировка | + | + | + | + | + | + | - | + |

На основании проведенного анализа были сделан вывод о том, что при нормальной эксплуатации установок битумирования РАО необходимо проводить очистку отходящих газов, и нейтрализацию неорганизованных выбросов в атмосферный воздух.

Без количественных показателей сложно оценить реальное воздействие, оказываемое установкой битумирования на окружающую среду. Можно только сделать вывод о потенциально опасном воздействии, оказываемом выбрасываемыми веществами.

При выбросе загрязняющих веществ в атмосферный воздух может произойти взаимодействие некоторых групп веществ (например, такая группа веществ как диоксид азота и диоксид серы) друг с другом и усиление негативного воздействия на окружающую среду. Данный процесс называется эффектом суммации,

Эффектом суммации принято называть свойство двух или нескольких вредных химических веществ действовать на организм человека однонаправлено, т.е. повреждать одни и те же органы и системы, оказывая одинаковый или сходный негативный эффект. Опасность веществ с эффектом суммации заключается в том, что повреждающее действие на здоровье человека при их одновременном присутствии будет сильнее, чем можно было бы предполагать, исходя из фактических концентраций каждого из этих веществ.

При транспортировке битума для применения его на установке битумирования в атмосферный воздух попадает свинец [39], который является отравляющим веществом, относящимся к первому классу опасности, накопление которого влияет на целый ряд систем организма и которое особенно вредно для детей младшего возраста[40].

Следует отметить, что битумирование является потенциально пожароопасным методом переработки РАО и при возгорании в атмосферный воздух произойдет залповый выброс загрязняющих веществ, характерных для горения нефтепродуктов (фенолы, бенз(а)пирен, формальдегид и другие [41]), что вызовет крайне негативные последствия на месте чрезвычайной ситуации.

**2.2 Воздействие цементирования радиоактивных отходов на окружающую среду**

Цементирование жидких радиоактивных отходов низкой и средней активности как способ их кондиционирования и подготовки к длительному хранению и захоронению в течение многих лет используется практически во всех развитых странах.

Процесс цементирования основан на смешении жидких отходов с цементом. В результате после отверждения смеси образуется материал, основу которого составляют цемент и радиоактивные отходы (твердые либо жидкие). Для получения прочных цементных блоков необходимо, чтобы солесодержание в них не превышала 200 г/л [42].

Известны различные композиции на основе цементов для отверждения жидких радиоактивных отходов, в состав которых входит собственно вяжущее вещество (портландцемент, шлакопортландцемент, доменные шлаки) в количестве не менее 70% от массы сухой смеси, сорбционные добавки (обычно это природные алюмосиликатные материалы, например, бентонит, вермикулит, каолин) - до 20%, необходимые для фиксации радионуклидов, а также прочие модифицирующие добавки [42].

При простейшем отверждении ЖРО цементированием представляет собой ЖРО и портландцемент в соотношении 1:(1,3-2,0), что обеспечивает получение монолитных блоков с прочностью при сжатии не менее 5 Мпа, что соответствует требованиям ГОСТ Р 518832002 [42].

Образующийся при цементировании продукт обладает целым рядом достоинств: высокой механической прочностью, является негорючим, радиационно и химически устойчив.

Основным вяжущим материалом, используемым для цементирования радиоактивных отходов, признан портландцемент (ПЦ), основу которого составляет измельченный клинкер. Качество клинкера определяется его химическим и минералогическим составом. Химический состав портландцементного клинкера в основном характеризуется содержанием оксидов, представленных в таблице 7.

Таблица 7. Процентное содержание оксидов в портландцементном клинкере [43]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Оксид | Содержание, % | Оксид | Содержание, % |
| CaO | от 64 до 67 | Fe2O3 | от 2 до 4 |
| SiO2 | от 21 до 25 | P2O5 | 0,1 до 0,3 |
| Al2O3 | от 4 до 8 | Na2O и K2O | от 0,5 до 1,0 |
| MgO | от 0,5 до 5,0 | TiO2 | от 0,1 до 0,3 |

Каждый из указанных оксидов влияет на конечные свойства цемента [43].

Например, повышенное содержание оксида кальция обеспечивает быстрый рост прочности и высокую марку цемента, но в твердом состоянии такой цемент отличается пониженной водоустойчивостью.

Цемент с повышенным содержанием SiO2 характеризуется замедленной скоростью набора прочности в начальный период твердения, но через полгода такой цемент будет иметь высокую прочность и хорошую водо- и сульфатостойкость [43].

Повышенное (более 8%) содержание глинозема (Al2O3) ускоряет твердение цемента в первые часы и сутки, но приводит к снижению морозостойкости, водо- и сульфатостойкости. Скорость твердения портландцемента также можно увеличить за счет более тонкого помола клинкера. Однако увеличение тонкости помола приводит к росту потребления воды, что неблагоприятно сказывается на прочности и других свойствах цементного камня.

Введение в цемент поверхностно-активных веществ (ПАВ) замедляет скорость его твердения [28].

Таким образом, меняя состав цемента и используя те или иные добавки, можно регулировать свойства портландцемента.

При цементировании следует учитывать химический состав радиоактивных отходов.

Большинство макрокомпонентов радиоактивных отходов не являются инертными наполнителями цементной матрицы, а вступают во взаимодействие с вяжущим материалом, влияя на качество конечного продукта. Поэтому во всех странах изучению механизма взаимодействия ЖРО с матричным материалом и разработке технологических режимов цементирования уделяется большое внимание каждая комбинация отход/матричный материал должна подвергаться определенным испытаниям. Рекомендованные испытания относятся к следующим свойствам: сопротивление сжатию, устойчивость к выщелачиванию, сопротивление сжатию после испытаний в воде, устойчивость к биоразрушению и радиации, устойчивость к термическим циклам, как и контроль, подтверждающий, что содержание свободной воды в отвержденном продукте не превышает 0,5% [45].

Испытания на радиационную и биологическую устойчивость проводятся только в том случае, когда отходы содержат органические продукты, так как γ-облучение имеет очень малое влияние на цементный материал до относительно высоких доз.

Существует ряд требования к качеству цементных компаундов, в Российской Федерации они изложены в ГОСТе Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования. (2003-01-01). В качестве критериев качества цементного компаунда выбраны следующие параметры:

* скорость выщелачивания;
* механическая прочность при сжатии;
* радиационная устойчивость;
* морозоустойчивость;
* устойчивость к длительному пребыванию в воде.

Радиационная устойчивость, морозоустойчивость и устойчивость к длительному пребыванию в воде характеризуются пределом прочности при сжатии образцов, прошедших соответствующие испытания. Снижение прочности по сравнению с контрольными образцами, хранившимися в воздушно-влажных условиях, не должно превышать 25%. При этом механическая прочность испытанных образцов не должна быть ниже допустимого предела прочности при сжатии. Если прочность образцов, выдержанных в течение 28 суток, не достигает 75 % окончательной прочности компаунда, время их выдержки перед последующими испытаниями должно быть увеличено [42].

Показатели качества цементных компаундов, такие как выщелачиваемость, механическая прочность, морозостойкость, водоустойчивость, радиационная и биологическая устойчивость, зависят от физических свойств твердого цементного компаунда и химических свойств нуклидов, определяющих их подвижность в матрице.

Таблица 8. Допустимые пределы показателей качества цементных компаундов [42]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование показателя | Значение | Методика испытания |
| Скорость выщелачивания (по Cs-137), г/см2\*сут, не более | 1·10-3 | По ГОСТ 29114 |
| Механическая прочность (предел прочности при  сжатии, МПа (кг/ см2), не менее | 4,9 (5,0) | По ГОСТ 310.4 |
| Радиационная устойчивость при облучении, Гр | 1·106 | Изменение механической  прочности |
| Морозостойкость (количество циклов замораживания/оттаивания), не менее | 30 | По ГОСТ 100601 |
| Устойчивость к длительному пребыванию в  воде, сут | 90 | Изменение механической  прочности |

Для отверждения ЖРО возможно применение шлакопортландцемента, и при подборе вяжущих компонентов и условий проведения процесса цементирования могут быть получены продукты высокой механической прочности: более 12 МП а при содержании 400 кг сухого остатка радиоактивных отходов в 1м3 смеси [45].

Цементирование жидких радиоактивных отходов низкой и средней активности как способ их кондиционирования и подготовки к длительному хранению и захоронению в течение многих лет используется практически во всех развитых странах в различных вариантах аппаратурного оформления.

На данный момент наиболее активно применяющиеся методы цементирования представлены ниже [45].

1. в емкости с мешалкой, из нижней части которой цементная смесь поступает на затаривание в бочки или бетонные емкости;



Рисунок 7. Цементирование ЖРО в смесителе непрерывного действия

1. в бочке, предназначенной для хранения цементированных отходов, при перемешивании мешалкой многократно; при варианте однократного использования мешалку оставляют в бочке;

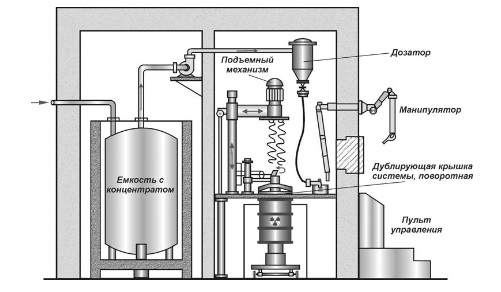


Рисунок 8. Установка цементирования ЖРО

1. в герметично закрытой бочке вращением её одновременно в нескольких плоскостях

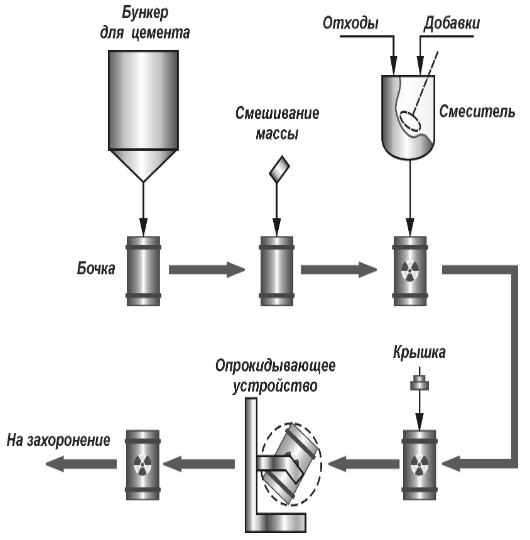


Рисунок 9. Цементирование в герметично закрытой бочке вращением

1. в потоке объёмным смешением.

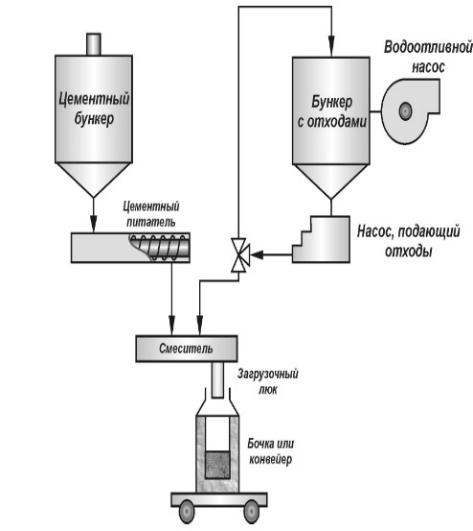


Рисунок 10. Цементирование ЖРО в объёмном смесителе

В первых трёх случаях процесс проводится периодически, в последнем – непрерывно.

Для отходов низкой активности иногда применялся метод заливки цементного раствора в гидроизолированные траншеи. Необходимая текучесть обеспечивалась высоким водовяжущим отношением (около 0,7). При этом содержание солей не превышало 4–5% (по массе), что определяло значительный объем отходов при отверждении.

Цементирование применяется для отверждения ЖРО с удельной активностью до 3,7·106 Бк/л (10-4Ки/л) [13]. Захоронение цементных блоков с удельной активностью больше 10-5Ки/л требует гидроизоляции и герметизации хранилища. К недостаткам цементирования ЖРО можно отнести:

* малое сокращение объема конечного продукта (по сравнению с исходным объемом ЖРО, подаваемым на цементирование), из-за большого количества воды, используемого для получения цемента необходимой вязкости. Максимальный коэффициент сокращения объема составляет 1,3 при удовлетворительном качестве конечного продукта [34];
* значительная вымываемости (вышелачиваемость) из цемента включенных в него компонентов при контакте с водой Скорость выщелачивания для цементных блоков составляет 10-3-10-2г/(см2·сут) [34]. Для сравнения: для остеклованных материалов скорость составляет 10-5-10-6 г/(см2·сут; для битумных блоков – 10-4-10-5г/(см2·сут)) [13].

Значительным преимуществом цементирования над битумированием является то, что методом цементирования могут отверждаться не только жидкие, но и твердые РАО.

Комплекс цементирования предназначен для кондиционирования жидких и твердых радиоактивных отходов путем включения их в матричные композиции на основе вяжущих веществ (портландцемент, шлакопортландцемент, металлургический шлак и др.) и размещения в контейнеры для промежуточного хранения и последующего захоронения.

В комплексе цементирования предусматривается выполнение следующих операций:

* прием и подготовка к переработке ЖРО;
* цементирование ЖРО;
* промывка смесителя;
* заливка цементного компаунда в контейнеры НЗК/КМЗ;
* газоочистка сдувки дыхания;
* прием, подготовка и транспортирование сухих компонентов.

Среди технологических выбросов загрязняющих веществ комплекса цементирования, за исключением, радиоактивных, присутствуют выбросы пыли неорганической, содержащей менее 20% диоксида кремния и пыли неорганической, содержащей 70-20% диоксида кремния от узла приема, подготовки и транспортировки сухих компонентов при пересыпке расходного цемента и бентонита в бункера [37].

Также к выбросам существующего производства прибавятся выбросы вредных (загрязняющих) веществ от работы двигателя внутреннего сгорания при проезде цементовоза по территории площадки. При этом в атмосферный воздух будут выбрасываться: Азота диоксид (Азот (IV) оксид), Азот (II) оксид (Азота оксид), Углерод (Сажа), Сера диоксид (Ангидрид сернистый), Углерод оксид, Керосин [46].

Перечень вредных (загрязняющих) веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух от цеха цементирования, за исключением радиоактивных, представлен в таблице 9.

Таблица 9 - Перечень вредных (загрязняющих) веществ, за исключением радиоактивных, выбрасываемых в атмосферу установкой цементирования [46]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Загрязняющее вещество | Используемый критерий | Значение критерия мг/м3 | Класс опас- ности | Суммарный выброс вещества | |
| г/с | т/год | |
| Азота диоксид (Азот (IV) оксид) | ПДК м/р | 0,2 | 3 | 2,1·10-4 | 2,8·10-4 | |
| Азот (II) оксид (Азота оксид) | ПДК м/р | 0,4 | 3 | 3,4·10-5 | 4,5·10-5 | |
| Углерод (Сажа) | ПДК м/р | 0,15 | 3 | 2,1·10-5 | 2,3·10-5 | |
| Сера диоксид (Ангидрид сернистый) | ПДК м/р | 0,5 | 3 | 4,3·10-5 | 5,2·10-5 | |
| Углерод оксид | ПДК м/р | 5,0 | 4 | 3,1·10-4 | 3,60·10-4 | |
| Керосин | ОБУВ | 1,2 | - | 6,9·10-5 | 8,2·10-5 | |
| Пыль неорганическая: 70-20% SiO2 | ПДК м/р | 0,3 | 3 | 1,3·10-6 | 1,4·10-5 | |
| Пыль неорганическая: до 20% SiO2 | ПДК м/р | 0,5 | 3 | 1,37·10-5 | 1,38·10-4 | |
| Всего веществ: 8 | | | | 6,98·10-4 | 9,92·10-4 |
| в том числе твердых: 3 | | | | 3,48·10-5 | 1,75·10-4 |
| жидких/газообразных: 5 | | | | 6,64·10-4 | 8,27·10-4 |

Из данной таблицы мы можем сделать вывод, о том, что при цементировании радиоактивных отходов в атмосферный воздух попадает 8 веществ не ниже 3 класса опасности общим объемом 9,9·10-4 т/год, что значительно ниже предельных значений негативного воздействия и, следовательно, не наносит серьезного ущерба окружающей среде.

В этой главе была решена третья задачи, а именно проанализировали характер воздействия на окружающую среду установок битумирования и цементирования РАО

Исходя из этого негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду при цементировании и битумировании РАО, является незначительным при стандартных ситуациях, степень которого можно снизить, применяя систему очистки отходящих газов.

Следовательно, для того чтобы выявить наиболее приоритетный для использования на территории Ленинградской области метод отверждения радиоактивных отходов необходимо провести многокритериальный сравнительный анализ наиболее применимых методов для отверждения средне- и низкоактивных радиоактивных отходов (цементирование и битумирование).

**Глава 3. Обоснование приоритетного метода по отверждению РАО в Ленинградской области**

В ходе наших исследований мы изучили систему обращения с радиоактивными отходами, а также оказываемое на окружающую среду воздействие в результате кондиционирования РАО. Перед нами стояла еще одна задача, а именно обосновать выбор приоритетного метода отверждения РАО в Ленинградской области.

Для осуществления сравнительного анализа методов битумирования и цементирования введем следующие критерии:

* Качественные характеристики отверждаемых РАО на исследуемых установках;
* Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду;
* Свойства конечного продукта отверждения радиоактивных отходов;
* Экономические показатели;
* Этапность переработки*;*
* Процентное содержание РАО в конечном продукте;
* Производительность установок;
* Безопасность технологии.

Использование введенных критериев позволит обосновать выбор наиболее оптимального с точки зрения влияния на окружающую среду и технико-экономических показателей использования метода отверждения РАО.

К качественным характеристикам, по которым можно сравнить две исследуемые технологии, относятся удельная активность радиоактивных отходов, агрегатное состояние и солесодержание в жидких радиоактивных отходах.

Из полученных нами данных, в Ленинградской области (табл.3) за год больше всего образуется жидких радиоактивных отходов (до 108 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов, до 107 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) радиоактивных отходов до, 106 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов, до 105 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов) около 2,5 тыс. м3, твердых отходов образуется около 1,2 тыс. м3 (до 1011 кБк/кг - для тритий содержащих радиоактивных отходов, до 107 кБк/кг - для бета-излучающих (исключая тритий) РАО, до 106 кБк/кг - для альфа-излучающих (исключая трансурановые) радиоактивных отходов, до 105 кБк/кг - для содержащих трансурановые радионуклиды радиоактивных отходов).

Солесодержание в жидких радиоактивных отходах играет большую роль на качество конечного продукта отверждения РАО. При повышенном (более 550 г/л) содержании солей в жидких радиоактивных отходах конечная матрица получается очень неустойчивой и твердый компаунд начинает расслаиваться, вследствие чего разрушается и становится источником воздействия радиоактивного излучения на окружающую среду.

Для метода битумирования приемлемы РАО с солесодержанием 250 г/л, а цементирование 500 г/л[47].

Исходя из этого, можно сделать вывод, что отходы, выделяемые по выбранным критериям, больше подходят для отверждения методом цементирования.

Следующим критерием для сравнения является качество конечного продукта, в котором мы выделили выщелачиваемость, биоразрушение (разрушение почвенными бактериями) и вид контейнера, в который будут затариваться отвержденные отходы для дальнейшего хранения.

Стойкость отвержденных радиоактивных отходов к выщелачиванию радионуклидов является решающим фактором при концептуальном рассмотрении проблемы захоронения отходов. Способность к удержанию радионуклидов в различных матрицах может различаться на несколько порядков. Так, нормализованная скорость выщелачивания радиоцезия из цементной матрицы изменяется в пределах 1·10-4–1·10-1, из битума – 5·10-7–5·10-4, из глины – 1·10-5–1·10-4, из расплавленных силикатов – 1·10-8–1·10-6, из стекла – 5·10-8–5·10-5 г/(см2 сут.) [48].

Радиоактивные отходы, отвержденные методами цементирования и битумирования подвержены разрушению со стороны микроорганизмов [49, 35]. Микроорганизмы (в основном почвенные бактерии) способны использовать битумы, наряду с другими нефтяными производными, в качестве источника питания, в результате этого происходит изменение основных физико-механических свойств битумных композитов – в составе вяжущего уменьшается общее количество асфальтенов, которые придают битуму свойства вязкости и твердости [35]. Биогенная деструкция цементной матрицы в приповерхностных хранилищах РАО, заключающийся в том, что бактерии используют в качестве питательной среды компоненты радиоактивных отходов (нитратные соли, масла и органические жидкости, целлюлозные включения),в процессе метаболизма выделяют газы и кислоты в концентрациях, способствующих поро- и трещинообразованию в цементной матрице, что при длительном хранении ведет к снижению иммобилизационных свойств компаунда и ухудшению радиоэкологической безопасности хранилищ кондиционированных РАО[49]. Существуют методы улучшения свойств конечных цементных компаундов с РАО для предотвращения биоразрешения, что повышает безопасность их длительного хранения. Например, при добавлении биоцидных препаратов класса полигексаметиленгуанидинов (ПГМГ), повышаются водоудерживающие и пенетрационные свойства цементных растворов, а также формируется микроструктура, которая позволяет повысить прочность и биологическую стойкость цементных компаундов с различными видами жидких и твердых радиоактивных отходов [50].

С 11 июля 2011 г. в России вступил в силу Федеральный Закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», который на законодательном уровне регулирует отношения в области обращения с РАО. В данном законодательном акте закреплены следующие требования:

* радиоактивные отходы, образующиеся на территории РФ подлежат обязательному захоронению в пунктах захоронения радиоактивных отходов, то есть ПЗРО;
* все виды деятельности, связанные с захоронением РАО должен осуществлять Национальный оператор.

В обязанности национального оператора входит прием кондиционированных отходов на захоронение, соответствующих критериям приемлемости отходов (КПО) для захоронения. При разработке КПО для упаковок должны учитываться [51]:

* удельная активность РАО, суммарная активность упаковки РАО, суммарная активность альфа- и бета- (гамма) излучающих радионуклидов в упаковке, радионуклидный состав РАО;
* мощность эквивалентной дозы от упаковки РАО;
* поверхностное загрязнение упаковки РАО;
* массогабаритные параметры, ограничение веса и объема, учитывающие грузоподъемность механизмов и компоновочные решения сооружений ПЗРО;
* структурная стабильность формы РАО и другие требования.

В связи с этим стадия кондиционирования РАО, предусматривающая получение упаковки, пригодной для хранения, транспортирования и захоронения, играет важную роль, поскольку должна одновременно учитывать специфику переработанных низко- и среднеактивных отходов, а также требования последующих стадий обращения с упаковками. Этим объясняются высокие требования к контейнерам для размещения переработанных или подготовленных к кондиционированию твердых или отвержденных РАО.

В Российской Федерации с середины 90-х годов используются невозвратные контейнеры из композитных материалов, в основе которых содержится армированный бетон. Первым представителем этого класса контейнеров стал контейнер НЗК-150-1,5П, разработанный специалистами ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», ОАО «345 механический завод», ОАО «26 ЦНИИ» по заданию ОАО «Концерн Росэнергоатом». Контейнер предназначен для размещения в нем четырех бочек объемом 0,2 м3 каждая, или 1,5 м3 твердых или отвержденных среднеактивных отходов [52]. В таблице 10 представлены рекомендованные контейнеры для хранения и захоронения РАО. Самым распространённым видом контейнеров является НЗК-150-1,5П.

Контейнеры этого типа отвечают всем требованиям, связанным с хранением и захоронением РАО (таблица 11).

Таблица 10. Рекомендуемые контейнеры для жидких и твёрдых РАО[52].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номенклатура РАО | Рекомендуемый тип контейнеров | |
| Низкоактивные РАО | Среднеактивные РАО |
| Цементированные РАО (кубовые остатки, смолы, шламы) | КРАД, КМЗ, НЗК-Радон | НЗК-150-1,5П |
| Битумированные ЖРО Солевой плав | КО 1340, НЗК-150-1,5П(С) | КО 1340, НЗК-150-1,5П(С) |
| ТРО (прессованные, в бочках, навалом) | КРАД, КМЗ, НЗК-Радон | НЗК-150-1,5П |

В связи с этим, наиболее приемлемым типом контейнеров для захоронения жидких и твердых РАО является НЗК-150-1,5П, поскольку контейнеры данного типа могут использоваться при хранении или захоронении отходов разного типа, отвержденных и методом битумирования, и методом цементирования. Также в качестве положительного момента выбора контейнера одного типа можно выделить сокращение затрат на их приобретение, обусловленное снижением себестоимости вследствие стандартизированного производства контейнеров.

Таблица 11. Основные требования к контейнерам НЗК [53]

|  |  |
| --- | --- |
| Показатель безопасности | Требования к контейнерам |
| Радиационная безопасность | Мощность дозы на поверхности упаковки не более 2,0 мЗв/ч, а на расстоянии 1 м – 0,1 мЗв/ч. Допускается отступление от регламентированных значений мощности дозы на наружной поверхности НЗК при условии непревышения основного предела доз для персонала группы А |
| Механическая прочность | Контейнер должен выдерживать:  - статическую нагрузку на сжатие в течение 24 ч, равную пятикратному значению массы заполненного контейнера, моделирующую нагрузку при штабелировании;  - динамическую нагрузку, возникающую при падении контейнера с отходами на жесткое основание с высоты 0,5 м на днище и на угол между днищем и стенкой |
| Герметичность | Конструкция НЗК должна обеспечивать:  - герметичность соединений при внутреннем гидравлическом давлении 75 кПа;  - утечку по воздуху не более 500 Па/л∙с-1 |
| Устойчивость к внешним воздействиям | Выдерживает проектное землетрясение 7 баллов, температурное воздействие от -50 до +70 °С. Предел огнестойкости – 0,75 ч |
| Сохранение защитных свойств | Не менее 50 лет при хранении и до 300 лет при захоронении РАО в ПЗРО |

Следующий критерий, который мы рассмотрим это этапнопсть переработки РАО методами цементирования и битумирования, который, с нашей точки зрения, является показателем времени, затрачиваемого на переработку единицы отхода, соответственно, чем меньше этапов, тем больше отходов возможно отвердить тем или иным методом.

Этапы битумирвания:

* концентрирование ЖРО;
* смешивание солевого концентрата, содержащего радионуклиды с битумом;
* упаривание битумно-солевой смеси смешение солей, содержащих радионуклиды до получения битумно-солевого компаунда с 40% наполнением солями;
* перекачиваниея битумного компаунда в металлические контейнеры;

остывание металлических контейнеров с битумный компаундом и их герметизация в контейнер, который затем направляют на временное хранение в хранилище твердых радиоактивных отходов.

Этапы цементирования:

* включение в цементную матрицу низкоактивных и среднеактивных ЖРО;
* заливки полученным цементным компаундом низкоактивных и среднеактивных ТРО (прессованные ТРО, ТРО в 200 л бочках, элементы крупногабаритных ТРО);
* размещением в контейнеры для промежуточного хранения и последующего захоронения.

Мы видим, что методом цементирования отходы отверждаются за меньшее количество этапов, что значит данным метод является более технологически простым и быстрым, чем метод битумирования.

Экологические показатели, а именно воздействие, оказываемое на окружающую среду методами отверждения РАО (цементирование и битумирование), был разобран в прошлой главе и сделан вывод о том, что битумирование в большей мере воздействует на окружающую среду.

Следующим критерием, которым мы руководствовались при выборе приоритетного метода отверждения РАО для Ленинградской области, это стоимость установки по отверждению РАО и вяжущего материала, а также эксплуатационные расходы вяжущего материала, применяемого при кондиционировании РАО.

Таблица 12. Экономические показатели установок отверждения РАО[54]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Установка | Стоимость  млн. руб./ | Эксплуатационные  расходы, млн. руб./г |
| Установка цементирования | 160,0 | 6,5 |
| Установка битумирования | 185,0 | 7,4 |

Согласно полученным данным из таблицы 12, за первые пять лет эксплуатации двух выбранных установок, затраты на их использование составят (без учета затрат на материал):

* для битумирования: 185+7,4\*5 = 222 млн. рублей
* для цементирования: 160+6,5\*5 = 192,5 млн. рублей.

Исходя из этого за первые пять лет эксплуатации затраты на отверждение отходов методом битумирования будут на 30,5 млн рублей больше, чем для цементирования.

Согласно данным, опубликованным Федеральной Службой Государственной Статистики, средняя отпускная цена производителей цемента в России на внутренний рынок в апреле 2016 года составила 2 974,70 рублей за тонну цемента и 2 865,30 для цемента с добавками [55]. По данным бизнес-портала rosfirm.ru средняя цена за тонну битума на 24.04.17 г. в РФ составляет 12 712,50 руб. [56]. Не прибегая к сложным вычислениям, мы видим, что для предприятий занимающимся отверждением РАО, выгоднее закупать в качестве вяжущего материала цемент.

Последним критерием для сравнения был выбран – безопасность технологии. Метод битумирования из-за использования горючего вяжущего материала является потенциально пожароопасной технологией.

Таблица 13. Сравнение технологий битумирования и цементирования по выбранным критериям.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Критерии | Битумирование | Цементирование | \* |
| Характеристика РАО  -активность  -агрегатное состояние | ЖРО удельной активностью до 3,7·104 кБк/кг | ЖРО удельной активностью до 1,5·107 Бк/кг  ТРО удельной активностью до 0,5·107 Бк/кг | Ц\* |
| -солесодержание | 250 г/л [47] | 500 г/л[47] |  |
| Процентное содержание ЖРО в конечном продукте | **~** 45% (для ЖРО) [47] | **~**  40% (для ЖРО) [47] | Б\* |
| Воздействие на окружающую среду | - | + | Ц |
| Этапность | - | + | Ц |
| Производительность | по кубовому остатку до 200 л/ч [34] | по цементному раствору до 1000 л/ч. [34] | Ц |
| Экономические показатели  -стоимость установки  -стоимость вяжущего материала  -эксплуатационные расходы | 185 млн. руб [54]  12 712,50 руб. [56].  7,4 млн. руб/год [54] | 160 млн. руб [54]  2 974,70 руб. [55]  6,5 млн. руб/год [54] | Ц |
| Конечный продукт: |  |  |  |
| -выщелачиваемость  - биоразрешение | 1·10-4–1·10-1 [33]  + | 5·10-7–5·10-4[33]  - | Б |
| - контейнер | НЗК-150-1,5П, КО 1340 [51, 52] | НЗК-150-1,5П [51, 52] |  |
| Безопасность технологии | Пожароопасность | - | Ц |
| Итого: Ц – 6, Б -2. | | | |

\* Приоритетность использования в регионе Ц – цементирование, Б – битумирование.

В данной главе была выполнена пятая поставленная задача, а именно дана рекомендация по выбору приоритетного метода отверждения РАО на территории Ленинградской области.

Сопоставление методов битумирования и цементирования по предложенным в исследовании критериям показал, что по 6 из 8 критериев (качественные характеристики отверждаемых РАО на исследуемых установках, воздействие, оказываемое на окружающую среду, качество конечного продукта, экономические показатели, этапность переработки, количество включаемых РАО в вяжущую матрицу, производительность установок, безопасность технологии.) наиболее приоритетным является метод цементирования.

Таким образом, на основании проведенного исследования структуры образуемых на территории Ленинградской области РАО и методов их отверждения было выявлено, что наиболее приоритетным методом отверждения РАО в регионе является цементирование.

**Заключение**

В результате проведенного исследования были выполнены все задачи:

1) В рамках решения первой задачи (проанализировать существующие подходы к классификации РАО; дать характеристику схемы обращения с РАО) был выполнен анализ существующих в отечественной и мировой практике подходов к классификации РАО и выбрана, в качестве наиболее удобной, классификация, представленная в ОСПОРБ 99. Она делит РАО по агрегатному состоянию (твердые и жидкие) и по активности (низко-, средне-, высокоактивные РАО). Это оказывается удобным для анализа воздействия оказываемого радиоактивными отходами на окружающую среду в целом и на человека в частности.

2) Выполненный в рамках второй задачи (изучить характер и структуру РАО, образующихся на территории Ленинградской области) анализ образующихся на территории Ленинградской области отходов показал, что ежегодный объем поступающих на переработку отходов составляет 3 600 м3, большая часть которого приходится на жидкие отходы с удельной активностью до 103 кБк, а накопленные отходы составляют 1,6·105 м3с суммарной бета-активность 2,1·1016Бк

3) В рамках решения третьей задачи (проанализировать характер воздействия на окружающую среду установок битумирования и цементирования РАО) было в начале оценено воздействие, оказываемое методом битумирования радиоактивных отходов на окружающую среду. В этом плане основными технологическими процессами являются нагрев, транспортировка, хранение. Самым опасным выбрасываемым веществом является свинец и его неорганические соединения. При чрезвычайной ситуации (возгорание битума) в атмосферный воздух будут выделяться вещества характерных для горения нефтепродуктов (фенолы, бенз(а)пирен, формальдегид и другие), что вызовет крайне негативные последствия на месте чрезвычайной ситуации.

При цементировании радиоактивных отходов в атмосферный воздух попадает 8 веществ не ниже 3 класса опасности. Общий их объем составляет 9,9·10-4 т/год, выброс каждого отдельного вещества не превышает нормативные показатели (ПДК, ОДК), эффекта суммации не наблюдается, следовательно, данное воздействие не наносит серьезного ущерба окружающей среде.

Воздействие, оказываемое на окружающую среду при цементировании и битумировании РАО, минимально при стандартных ситуациях, степень которого можно снизить, применяя систему очистки отходящих газов.

4) В рамках решения четвертой задачи (дать рекомендации по выбору приоритетного метода отверждения РАО на территории Ленинградской области) был выполнен сравнительный анализ двух методов отверждения радиоактивных отходов по восьми выбранным автором критериям (качественные характеристики отверждаемых РАО на исследуемых установках, воздействие, оказываемое на окружающую среду, свойства конечного продукта, экономические показатели, этапность переработки, количество включаемых РАО в вяжущую матрицу, производительность установок, безопасность технологии). По 6 из 8 критериев лидирует метод цементирования, а это значит, что данный метод является приоритетным для внедрения на территории Ленинградской области.

Все поставленные задачи были выполнены. Цель исследования достигнута, а именно оценено воздействие на окружающую среду от не радиоактивных веществ методов цементирования и битумирования, которое оказалось незначительным, и даны рекомендации по приоритетному методу отверждения РАО на территории Ленинградской области.

**Список литературы**

1. Производство электроэнергии и теплоэнергии. Россия в цифрах. – 2015 г. Электронный ресурс. URL: <http://www.gks.ru/bgd/regl/b15_11/IssWWW.exe/Stg/d01/15-35.htm> Дата обращения: 19.05.17
2. Атомная энергия в мире. Группа компаний Росатома «Атомэнергомаш». Электронный ресурс. URL: <http://www.aem-group.ru/mediacenter/informatoriy/atomnaya-energetika-v-mire.html> Дата обращения: 19.05.17
3. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. – Под общей редакцией Е.В.Евстратова, А.М.Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А.Большова, И.И.Линге. – 2012 г. – 356 с. – Т1-Т2
4. Публичный годовой отчет государственно корпорации по атомной энергетике «РОСАТОМ» за 2015г. 2014г. Москва. Электронный ресурс. URL: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/e21/e21ced22b2cc8d7fed8d83cadab6d0b8.pdf> Дата обращения: 21.05.17
5. ФЦП «Обеспечения ядерной и радиационной безопасности на 2016- 2020 годы и на период до 2030 года»
6. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. N 190-ФЗ  
   "Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (последняя редакция 2 июля 2013 г.)
7. Серия норм МАГТЭ по безопасности, № GSG-1 Классификация радиоактивных отходов. Общее руководство по безопасности. Международное агенство по атомной энергии, Вена, 2014 г.
8. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009" (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. N 47);
9. Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010), утвержденными Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40
10. Отчет по экологической безопасности за 2015 год ФГУП «НО РАО», 2016 г. Электронный ресурс, код доступа: <http://www.norao.ru/upload/catalog_NORAO_200x200%20(2).pdf>. Дата обращения: 20.05.17
11. Предприятие государственной корпорации «Росатом» РосРАО. Классификация радиоактивных отходов. Классификация радиоактивных отходов в США Электронный ресурс. Код доступа: <http://archive.rosatom.ru/wps/wcm/connect/rosrao/rosraosite/activity/conversion/classification/b2c6d500446b88b3a4fdefc800b48570>. Дата обращения: 19.05.17
12. ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года»
13. АхмедзяновВ.Р., ЛащёноваТ.Н., МаксимоваО.А. Обращение с радиоактивными отходами: учебное пособие / под ред. Касьяненко А.А. – М.: ИАЦ «Энергия», 2008. –282 с.
14. Журнал «Безопасность окружающей среды. №4-2009
15. Обеспечение безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. Российское атомное общество. Электронный ресурс. Код досупа: http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/03/04/31541НП-053-04. Дата обращения: 23.05.17
16. Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии – Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов
17. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. МАГАТЭ, Вена, 2009 г.
18. ГОСТ 12916-89 Транспортирование радиоактивных веществ.
19. НП 055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности"
20. Эксплуатация АЭС. Ч. II. Обращение с радиоактивными отходами: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011
21. Общая информация о ЛАЭС-2. Электронный ресурс. Код доступа: <http://www.lnpp2.ru/?q=node/2>. Дата обращения: 20.05.17
22. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду. «Пункт захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности в районе расположения Ленинградского отделения филиала «Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО». Москва, 2013 г.
23. Сайт АО «Экомет-с». Электронный ресурс. Код доступа: <http://www.ecomet-s.ru>. Дата обращения: 18.05.17
24. Отчет по экологической безопасности Росэнергоатома «Ленинградская АЭС» за 2015 г
25. Отчет по экологической безопасности Филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» за 2014 г., 2015 г.
26. Материалы обоснования лицензии на сооружение радиационного источника в филиале «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (Ленинградское отделение). 2016
27. Отчет по экологической безопасности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Электронный ресурс. Код доступа: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/0d3/0d382fb9dd816901ce51fc8ee6fcfbb6.pdf>
28. Быстров Н.В., Котлярский Э.В. Органические вяжущие. 2015
29. АБЗ Линт. Статья о битуме. Электронный ресурс. Код доступа: https://www.abzlint.ru/articles/bitum.shtml
30. Ярцев, В. П. Битумные композиты : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 270102, 270105, 270205 / В. П. Ярцев, А. В. Ерофеев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ»,2014. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1255-5.
31. В.В. Гафароваа, Т.А. Кулагина Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов. Журнал Сибирского Федерального университета Engineering & Technologies, 2016, 9(4)
32. Ключников А.А., Пазухин Э.М. и др. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними, род ред. Шигеры Ю. М., Чернобыль 2005
33. Патент на установку битумирования. Электронный ресурс. Код :<http://www.freepatent.ru/images/patents/485/2488421/patent-2488421.pdf> . Дата обращения: 17.05.17
34. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС : учебное пособие для вузов / М.А. Скачек. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с
35. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Федорцов А.П., Пронькин С.П. Исследование механизмов повреждения битумных композитов в условиях воздействия биологических агрессивных сред**.** Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 13) – С. 2787-2800
36. Отверждение жидких отходов среднего уровня активности с использованием неорганических вяжущих/ А.С.Поляков, М.И.Жихаревидр.//Атомнаяэнергия.1985.Т.58.Вып.4.С.249–252
37. Материалы оценки воздействия на окружающую среду при сооружении радиационного источника в филиале «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (Ленинградское отделение)
38. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ Атмосфера).Санкт-Петербург.2010
39. Методика проведения инвентаризации выбросов зягрязняющих веществ в атмосферу для асфальтобетонных заводов (расчетным методом)
40. Информационный бюллетень Всемирной организации здравоохранения. Электронный ресурс. Код доступа: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/ru/ -.
41. ТКП 17.08-08-2007 (02120) «Правила расчёте выбросов при пожарах»
42. ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования (2003-01-01).
43. Чистов Ю.Д., Тарасов А.С. Разработка многокомпонентных минеральных вяжущих веществ. Российский химический журнал, 2003. Т.XLVII, No 4, 12
44. Thomas Jungling, John Greeves. Nuclear Regulatory Commission. Regulations and Experience with Solidification. Stabilization Technology. American Society for testing and materials, Philadelphia, 1989, 77-82
45. Отверждение жидких отходов среднего уровня активности с использованием неорганических вяжущих/ А.С.Поляков ЧМ.И.Жихаревидр.//Атомнаяэнергия.1985.Т.58.Вып.4.С.249–252
46. Материалы обоснования лицензии на сооружение радиационного источника в филиале «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (Ленинградское отделение). 2016
47. Методы переработки жидких радиоактивных отходов Муратов О.Э. и др. под ред. Тихонова М.Н., Санкт-Петербург, 2012 г
48. Миронов В. П., Журавков В. В. Обращение с радиоактивными отходами.Учебно-методическое пособие.Минск.2009 г.
49. Горбунова О.А. Предотвращение биогенной деструкции и повышение качества цементной матрицы, иммобилизирующей радиоактивные отходы. Автореферат. Москва. 2012 г.
50. Варлаков А.П., Горбунова О.А. и т.д. Модифицирующие комплексные добавки в технологиях цементирования радиоактивных отходов. Медицина труда и промышленная экология № 2, 2006.
51. Разработка методов отверждения жидких высокоактивных отходов в СССР / А.С. Никофоров, В.Н. Основин и др. // Доклады и выступления на 11-й ежегодной конференции ЯО. М., 1992. Ч. 2. С. 260
52. Сорокин В.Т. и др. Контейнеры для Радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Ядерная и радиационная безопасность№ 2 (68)-2013. 2013 г.
53. Сорокин В.Т. и др. Радиационные аспекты использования контейнеров НЗК-150-1,5П при кондиционировании радиоактивных отходов. Ядерная и радиационная безопасность№ 2 (76) - 2015. 2015 г.
54. Шматко С.И. Автореферат диссертации по энергетике, 05.14.03, диссертация на тему: Гидротермальная переработка кубовых остатков АЭС. Москва, 2007 г.
55. Федеральная Служба Государственной Статистики. Электронный ресурс. Код доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\_main/rosstat/ru/statistics/tariffs/#
56. Бизнес-портал rosfirm.ru. Электронный ресурс. Код доступа: <http://monitoring.rosfirm.ru/chart/bitum-pmc1893.htm>
57. Strategy and methodology for radioactive waste characterization. IAEA.TECHDOC-1537(2007)
58. Б.А.Брунштейн. Производство спиртов из нефтяного и газового сырья. Ленинград. 1964 г.].)
59. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1990
60. Белозерский Г.Н. Радиационная экология : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Г. Н.Белозерский. - М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 384
61. Василенко О. И. Радиационная экология. – М.: Медицина, 2004. – 216 с.
62. ГН 2.2.5.1313-03 Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
63. ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка»
64. ГОСТ 12916-89 Транспортирование радиоактивных веществ.
65. Государственная программа Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса». URL: http://www.rosatom.ru/resources/6db41980452a67398da1df3b9a535f81/progr\_razv.pdf
66. Зуевич Ф.И., Тихонов М.Н., Довгуша Л.В. и др. Радиационно-гигиенические проблемы влияния радона на состояние здоровья населения. – СПб.: Полиграф-Ателье, 2011
67. Закон N 1244-1 РФ О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭ
68. Ключников А.А., Пазухин Э.М. и др. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними, род ред. Шигеры Ю. М., Чернобыль 2005
69. Коноплев К.А. Нейтроны для большой науки // Сборник «50 лет реактору ВВР-М», Гатчина, ПИЯФ, 2009
70. Конторль химических и биологических параметров окружающей среды. Под ред. Исаева Л.К. СПБ, Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998 – 896с.
71. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. – М: ИздАТ, 2000.– 384 с.
72. Лабейш В.Г. Природоохранные технологии в теплоэнергетике. – СПб.: СЗТУ, 2002.
73. Методы переработки жидких радиоактивных отходов Муратов О.Э. и др. под ред. Тихонова М.Н., Санкт-Петербург, 2012 г
74. Муратов О.Э. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в Северо-Западном регионе России // Сборник материалов II Регионального форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность» 2008 г.
75. Миронов В. П., Журавков В. В. Обращение с радиоактивными отходами Учебно-методическое пособие.Минск.2009 г.
76. НП 055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности"
77. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ Атмосфера).Санкт-Петербург.2010
78. РД 34.03.307-87 «Правила пожарной безопасности при производстве строительно-монтажных работ на объектах Минэнерго СССР»
79. Рекомендации по установлению критериев приемлемости кондиционированных радиоактивных отходов для их хранения и захоронения. РБ-023-02. Утверждены постановлением Госатомнадзора РФ от 10 января 2002 г. № 1.
80. **Рылов М.И**., **Муратов О.Э**. Системный анализ и оценка радиационной обстановки в Ленинградской области. Электронный ресурс. Код доступа: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6796
81. Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на
82. Cтовбур В. Система аварийного реагирования ГК «Росатом» // Безопасность окружающей среды , 2009, № 2,
83. Технологический регламент. Переработка ЖРО на установке битумирования. ФГУП «РосРАО»
84. Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. N 390-ФЗ "О безопасности"
85. Федеральный закон от 9 января 1996 г. N 3-ФЗ  
    "О радиационной безопасности населения";
86. Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ  
    "Об охране окружающей среды";
87. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ  
    "Об использовании атомной энергии"
88. Федеральная Служба Государственной Статистики Электронный ресурс. Код доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\_main/rosstat/ru/statistics/tariffs/#
89. Чистов Ю.Д., Тарасов А.С. Разработка многокомпонентных минеральных вяжущих веществ. Российский химический журнал, 2003. Т.XLVII, No 4, 12
90. Эксплуатация АЭС. Ч. II. Обращение с радиоактивными отходами: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011
91. Электронный ресурс. Код доступа: http://www.lnpp2.ru/.
92. Электронный ресурс. Код доступа: http://www.lennpp.rosenergoatom.ru/
93. <http://www.vast.vrn.ru/auction.html> - Документация по продаже движимого имущества Воронежской АСТ
94. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ «Обиспользованииатомнойэнергии*»* (последняя редакция 3 июля 2016 г.)