

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОПЕРАТОР ПО ОБРАЩЕНИЮ
С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ»

Бамборин Михаил Юрьевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ
РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО
ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность:

2.8.7 - Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

д.т.н., профессор Е. В. Кузьмин

Москва 2024 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблема обращения с радиоактивными отходами (РАО) в странах, использующих атомную энергию, приобрела большие масштабы, представляя угрозу территориям с проживающим на них населением. Хранилища РАО, приповерхностные и подземные, построены во многих странах, это: СІГЕО (Франция), Форстмарк (Швеция), Онкало (Финляндия), Батапати (Венгрия), Конрад (Германия), всего более 50 объектов.

В Российской Федерации реализуется федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года», направленная на создание современных, инновационных объектов инфраструктуры по переработке РАО и строительству пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО).

В соответствии с Федеральным законом РФ от 11.07.2011 № 190-ФЗ, под пунктом приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО), для размещения твердых РАО, классов 3 и 4, по классификации, утвержденной Постановлением Правительства от 19.10.2012 № 1069, понимается пункт захоронения, включающий в себя сооружение, размещенное на одном уровне с поверхностью земли или на глубине до 100 м от поверхности. Пункт приповерхностного захоронения РАО с применением передовых технических решений построен в г. Новоуральске Свердловской области.

ППЗРО, представляющие собой частично заглубленные железобетонные хранилища - модульные сооружения, заполненные металлическими либо железобетонными контейнерами с РАО, подвержены разрушению из-за внутренней деградации и внешнего воздействия поверхностных и подземных вод, проникающих к несущим и изолирующим конструкциям.

В результате химического взаимодействия солей, содержащихся в воде, с цементными матрицами и заполнителями, элементами конструкций, в течение геологически значимого периода времени (сотни и тысячи лет) происходит выщелачивание бетона, связующих звеньев материала контейнеров, стен, оснований и покрытий модульных сооружений ППЗРО.

Для обеспечения длительного экологически безопасного хранения РАО в пунктах приповерхностного захоронения необходимо обосновать параметры и разработать проекты горнотехнических сооружений, обладающих высокими изолирующими свойствами, устойчивыми во времени, параметры имеющихся бетонов явно недостаточны. Наиболее эффективными в этом отношении являются конструкции из высокопрочных бетонов и специальные противofiltrационные завесы во вмещающих горных породах.

В этой связи разработка научно-методической базы обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом использования инновационных конструктивных материалов и высокоэффективных барьеров безопасности, обеспечивающих долговременную изоляцию радиоактивных отходов 3 и 4 классов, является весьма актуальной проблемой, имеющей важное значение в научном, практическом и экологическом аспектах.

Цель диссертационной работы состоит в совершенствовании и трансформации методологии выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом использования инновационных конструктивных материалов и высокоэффективных барьеров безопасности, обеспечивающих устойчивые временные изолирующие параметры в условиях воздействия агрессивной геотехнологической среды.

Идея работы состоит в выборе основных производственных проектных процедур и правил заявленной методологии, который должен базироваться на концепции поэтапного проектирования технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с использованием предлагаемых инновационных конструктивных материалов с высокими прочностными и противofiltrационными свойствами и высокоэффективными барьерами безопасности на основе использования многокомпонентных геокомпозитных материалов, что позволяет эффективно и целенаправленно формировать стратегию экологически безопасного захоронения радиоактивных отходов в условиях риска реализации сценариев аварийных ситуаций.

Задачи исследований:

- обобщить мировой опыт формирования барьеров безопасности на основе использования многокомпонентных геокомпозитных материалов при размещении РАО в приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов;
- обосновать и создать геокомпозитные материалы повышенной нормативной прочности, плотности, морозостойкости и сульфатостойкости, с низкими фильтрационными, миграционными свойствами, для проектирования и возведения объектов финальной изоляции РАО, обладающих высокими изоляционными характеристиками в геологическом масштабе времени;
- установить параметры изготовления и возведения трубошпунтовой противofiltrационной завесы в горных породах вокруг объектов финальной изоляции РАО, для проектирования и создания инженерных барьеров, предотвращающих коррозионные процессы в модульных сооружениях при долгосрочной эксплуатации;
- обосновать параметры элементов конструкций ППЗРО при проектировании и создании водонепроницаемой грунтоцементной завесы в основании модульных сооружений на основе струйной цементации, для улучшения нормативных противofiltrационных характеристик;
- определить эффективность возведения инженерных барьеров безопасности - трубошпунтовой и грунтоцементной завес, с использованием прогнозных геофильтрационной и геомиграционной моделей распространения во вмещающих породах долгоживущих малосорбируемых радионуклидов при выходе из ППЗРО;
- разработать метод определения сценариев аварийных ситуаций в работе системы инженерных барьеров безопасности, позволяющий прогнозировать опасные сочетания событий по выходу барьеров безопасности из строя и своевременно их предотвращать.

Положения, выносимые на защиту:

1. В условиях глобализации основных составляющих мировой экономики и усиления требований в области обеспечения должного уровня экологической безопасности актуализируются стратегические направления проектирования технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, которые в настоящий период недропользования должны быть строго увязаны с использованием конструктивных материалов на основе суперпластифицирующих добавок – нафталинсульфатов (1) и поликарбоксилатов (2), улучшающих адсорбцию частиц цемента на границе фаз цемент-вода, диспергирование частиц цемента, что обеспечивает получение полной номенклатуры марок бетонов от В7,5 до В70, увеличивает сроки долговременной изоляции пунктов захоронения. При этом усиливается процесс водоредукции в стабилизации изолирующей коллоидной системы бетона, повышается количество сырьевых наполнителей, что, в конечном итоге, приводит к увеличению проектной плотности бетона прямо пропорционально увеличению их дозировки; при добавке нафталиносульфатов в объеме 1,1-1,3% от массы цемента плотность бетона достигает 2456 кг/м³, снижаются В/Ц с 1,0 до 0,45 и водопоглощение с 14,8 до 3,44%; при добавке поликарбоксилатов в объеме 0,4-0,5% плотность бетона возрастает до 2485 кг/м³, снижаются В/Ц с 0,49 до 0,33 и водопоглощение с 6,5 до 0,97%. При дальнейшем прогнозировании сохранения кризисных явлений в экономическом сегменте проектирование пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом представленных инновационных составляющих приобретает ключевое значение для развития собственных конкурентных преимуществ в экологической среде.

2. Концепция поэтапного проектирования технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов должна базироваться на совокупности методов и моделей, использование которых в процессе принятия проектных решений позволяет достигнуть симбатного прямо пропорционального увеличения изоляционных возможностей модульного сооружения: водонепроницаемости, морозостойкости и сульфатостойкости проектируемого бетона; применение добавки (1) от 1,1% до 1,4% от массы цемента позволяет получить бетон классов В7,5 - В40 с показателями морозостойкости от F50 до F300, водонепроницаемости от W0 до W12; применение добавки (2) в объеме 0,4%-0,6% позволяет

получить бетон классов В30-В70 с показателями морозостойкости от F300 до F600, водонепроницаемости от W8 до W20, что при сокращении объемов бетона при монтаже может увеличить максимальный срок коррозионного разрушения в сульфатной среде до 500-1000 лет, что укладывается в рамки требуемой надежности проектных решений с учетом динамической составляющей среды функционирования.

3. Методология выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом использования инновационных конструктивных материалов базируется на научно-методических принципах реализации проектных решений в области создания высокоэффективных барьеров безопасности на основе проектных технологических решений с использованием шпунтовых конструкций: - при этом требуемые конструктивные параметры шпунтового ограждения изолируемых модульных сооружений достигаются использованием облегченных трубошпунтов из композиционных материалов, диаметром от 200 до 800 мм, длиной до 20 м, в комбинации с технологией создания колонн струйной цементации в сочетании с композитными укрепляющими анкерами, что обеспечивает долговременную надежную защиту контейнеров с радиоактивными отходами от латеральных грунтовых вод, а вмещающей среды - от воздействия радионуклидов. Данная составляющая позволяет выявить необходимые проектные мероприятия, обеспечивающие перевод геотехнологической структуры в новое, более эффективное состояние, его стабилизацию и прогноз его жизненного цикла на краткосрочную и долгосрочную перспективу с одновременным снижением рисков, присущих вариантам развития аварийных ситуаций при различных вероятностях их реализации.

4. Адаптацию перехода к реализации проектной технологической платформы строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов целесообразно рассматривать и реализовывать с использованием разработанной процедуры, предусматривающей оптимизацию параметров проектной технологии струйной цементации, что обеспечивает получение высоких прочностных, изоляционных характеристик плиты из колонн грунтоцементной завесы под основанием модульных сооружений: - водоцементное отношение должно составлять В/Ц=0,7, диаметр колонны - 0,8м, эффективная скорость подачи цементного раствора в грунтовый массив - 100л/мин, что обеспечивает срок службы горизонтального барьера до 1100 лет.

5. Конечным элементом методологии выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов является переход ее составляющих из области обоснования проектных производственных процедур и правил в область управления ими за счет формирования оценочной процедуры риска реализации подобных проектов, ее содержательного наполнения, методов и инструментов, позволяющих сопоставлять опасные сочетания реализации аварийных событий по выходу барьеров безопасности из строя, приводящие к раннему проникновению радионуклидов в грунты, с привлечением метода комбинаторики и моделированием сценариев аварийных ситуаций, что дает возможность их прогнозировать и своевременно предотвращать.

Научная новизна предопределяется разработанными автором методическими аспектами совершенствования, трансформации и развития методологии выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом инновационной составляющей, базирующейся на совокупности предложенных автором новых научно-методических и системотехнических принципов, теоретических аспектах и механизмах использования новых конструктивных материалов и создания высокоэффективных барьеров безопасности, что позволяет объективно структурировать сложившиеся взаимосвязи между проектными элементами и факторами их реализации с учетом динамической составляющей процесса строительства, сопутствующих неопределенности и рисков. Все эти составляющие позволяют повысить уровень долговременной безопасности проектируемых объектов финальной изоляции радиоактивных отходов с использованием новых материалов и барьеров безопасности, обладающих высокими геомеханическими и противифльтрационными характеристиками.

Теоретическая значимость. Состоит в развитии и трансформации методологии выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с разработкой концепции, научно-методических и системотехнических принципов ее реализации с учетом инновационной составляющей в области использования новых конструктивных материалов и проектных решений в области создания высокоэффективных барьеров безопасности на основе проектных технологических решений с использованием шпунтовых конструкций и композитных материалов, которые позволяют сформировать соответствующие адаптационные способности к реализации механизма надежной защиты от ионизирующего излучения радиоактивных веществ и их негативного воздействия на население и окружающую среду.

Практическая ценность работы. Практическая значимость результатов исследования обусловлена реальной возможностью повысить эффективность реализации проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов на базе совершенствования методологии, методик и алгоритмического обеспечения формирования проектных производственных процедур и правил, что позволяет обеспечить их нормативную долговременную изоляцию на основе использования высокопрочных бетонов со специальными добавками, трубошпунтовой и грунтоцементной противофильтрационных завес во вмещающих породах со снижением уровня ионизирующего излучения и локализацией распространения радиоактивных веществ на прилегающих территориях.

Методы исследований. В работе использованы комплексные методы исследования, включающие: анализ и обобщение мирового опыта обращения с радиоактивными отходами; анализ теории и практики проектирования и строительства приповерхностных хранилищ для РАО 3 и 4 классов; анализ и обобщение информации о материалах на основе цемента, их характеристик и стандартах их исследований; экспериментальные - лабораторные исследования параметров и подбор бетонов с повышенной долговременной прочностью и плотностью при использовании суперпластифицирующих добавок; лабораторные и аналитические исследования применения полимерных шпунтов, методов струйной цементации для возведения противофильтрационных завес во вмещающих породах; производство расчётов параметров технологии применения шпунтов и струйной цементации с помощью программного комплекса GeoStab; использование метода комбинаторики для определения опасных сочетаний элементов системы инженерной безопасности ППЗРО; обработка результатов экспериментов методами математической статистики с использованием программных комплексов MS, Excel 2013, геофильтрационное и геомиграционное моделирование распространения долгоживущих малосорбируемых радионуклидов в породном массиве при выходе из ППЗРО.

Достоверность научных выводов, положений и результатов обеспечены корректностью постановки цели и задач исследований; надежностью и представительностью исходных данных; применением государственных стандартов, использованием современных методов геофильтрационного и геомиграционного моделирования распространения РАО во вмещающих породах, сертифицированного, поверенного оборудования; необходимым и достаточным количеством проведенных испытаний; статистической обработкой, сопоставимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований и непротиворечием их известным теориям геомеханики, практике ведения горных работ, воспроизводимостью результатов экспериментов, технологии возведения модульных сооружений, обеспечением долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения РАО.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях, что подтверждено актами внедрения от организаций:

1. ООО «СК «ИнжПроектСтрой», в технологии струйной цементации, г. Пермь, 2022г.
2. АО «Гиредмет» в технологии устройства противофильтрационной (противооползневой) завесы методом струйной цементации, г. Москва, 2023г.
3. ФГУП «НО РАО», в эксплуатационной документации, г. Москва, 2023г.

4. ООО «ИнТехПром» в технологии производства пластификаторов в бетон, г. Солнечногорск, 2023г.
5. ООО «Семикс» в технологии производств бетонных смесей, г. Москва, 2023г.
6. ООО «Фундаментстрой» в технологии устройства шпунтового ограждения из полимерного композиционного трубошпунта, г. Москва, 2023г.
7. ФГБУ «Гидроспецгеология» в численном геомиграционном и геофильтрационном моделировании, 2023г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 33 работы, включая 15 статей (в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ), 2 статьи в прочих изданиях, тезисы 16 докладов.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались:

1. II Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященной памяти академика Н. П. Сажина (РедМет-2022) (Москва, Россия, 23–25 ноября 2022).
2. VII научная-техническая конференция «Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства», (Москва, Россия, 20 октября 2022).
3. Международная конференция «Подземные воды-2022» (Пятигорск, Россия, 4-7 октября 2022).
4. X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022», (Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2022).
5. Всероссийская конференция с международным участием «Геохимия окружающей среды» (ГеОС-2022) (Москва, Россия, 23–26 августа 2022).
6. «Экологическая безопасность атомной отрасли: развитие и совершенствование отраслевой системы мониторинга радиационной обстановки (ОСМРО)» (Санкт-Петербург, Россия, 23–24 июня 2022 г.).
7. Международные научные чтения им. И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов, место издания (Москва, Россия, 6-7 сентября 2016 г.).
8. Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Инновации в материаловедении» (Москва, Россия, 3–5 июня 2013 г.).
9. Международная молодёжная научная конференция "XXXIX Гагаринские чтения". (Москва, Россия, 9–13 апреля 2013)
10. 8-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (Троицк, Россия, 25–28 сентября 2012 г.).
11. Международная молодежная конференция «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (Геленджик, Россия, 10–12 июля 2012 г.).
12. Научно-техническая конференция посвященной 100-летию со дня рождения профессора С.З. Бокштейна «Создание и исследование конструкционных материалов для новой техники» (Москва, Россия, 18 января 2011 г.).
13. Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии» (Москва, Россия, 16–18 ноября 2010 г.).

Личный вклад автора состоит в: постановке цели и задач исследований; непосредственном проведении лабораторных исследований, организации и выполнении опытов, отборе и подготовке образцов, проб проектируемых бетонов и специальных добавок к испытаниям, внедрённых в организациях (ООО «ИнТехПром», ООО «Семикс»); разработке технологии возведения дополнительных инженерных барьеров безопасности из шпунтовых и грунтоцементных завес, внедрённых в организациях отрасли (АО «Гиредмет»); расчёт вертикальной и горизонтальной противофильтрационных завес, внедрённых в организациях (ООО «СК «ИнжПроектСтрой», ООО «ФУНДАМЕНТ СТРОЙ»); расчетах вариантов опасных сценариев аварийных ситуаций с помощью математического аппарата комбинаторики, статистической обработке полученных результатов; разработке технологической документации,

внедрённой в организации отрасли (ФГУП «НО РАО»); организации и выполнении моделирования геофильтрационных и геомиграционных процессов, внедрённой в организациях (ФГБУ «Гидроспецгеология»).

Структура и объем работы: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 163 наименований, содержит 300 страниц машинописного текста, включая 54 таблицы, 99 рисунков и приложений на 42 страницах.

Автор выражает искреннюю благодарность А.В. Минину, Е.В. Кузьмину, В.Я. Красильникову, С.Л. Спешилкову, А.В. Глаголеву, С.В. Святцову, А.А. Куваеву, Н.А. Анисимову, А.Г. Малинину, А.С. Малинину, Н.А. Тимергалиеву, В.Я. Шишкину, В.И. Конусевичу, Е.Г. Галактионовой и М.Ю. Токаревой, сотрудникам отдела ГИС-технологий и математического моделирования Центра ОМНС ФГБУ «Гидроспецгеология» за помощь в организации математического моделирования, сотрудникам лабораторий ООО «ЕвроСинтез», ООО «ИнТехПром», ООО «СК «ИнжПроектСтрой» за помощь в организации экспериментальных исследований.

Содержание работы.

В первой главе приведен обзор и анализ проектных технологических платформ строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов в современных условиях недропользования. Приведено модельное представление пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, их конструктивные особенности с учетом системы инженерных барьеров безопасности.

Во второй главе представлена разработка научно-методических и системотехнических принципов совершенствования, трансформации и развития методологии комплексного обоснования и выбора проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов

В третьей главе представлена разработка концепции и методических основ проектирования пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом создания вертикального барьера долговременной безопасности на основе композиционного трубчатого шпунта с анкерным креплением и горизонтального барьера долговременной безопасности на основе противофильтрационной завесы с технологией струйной цементации.

В четвертой главе выполнена оценка эффективности, безопасности и надежности проектных решений в сфере долговременной изоляции ППЗРО с использованием технологической платформы трубошпунтовой и грунтоцементной завес, приведены валидация, анализ и оценка результатов прогнозного геофильтрационного и геомиграционного моделирования.

В пятой главе приведена оценка эффективности, безопасности и надежности проектных решений в сфере функционирования пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, позволяющая определять опасные сочетания событий по выходу барьеров безопасности из строя, прогнозировать долговременную безопасность системы инженерных барьеров ППЗРО.

Основное содержание работы

Геотехнология, проектирование горнотехнических систем охватывают большой спектр важнейших отраслей промышленности, это добыча полезных ископаемых – разработка рудных, угольных месторождений, горной химии, строительство подземных сооружений, включая тоннели, хранилища, станции и линии метрополитена. Основополагающий вклад в развитие и совершенствование проектирования горнотехнических систем внесли известные советские и российские ученые М.И. Агошков, Р.П. Каплунов, Д.М. Бронников, А. А. Борисов, В. Р. Именинов, И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, Д.Р. Каплунов, Д.М. Казикаев, В. В. Куликов, С. Д. Викторов, М. В. Рыльникова, Н. З. Галаев, В.И. Борщ-Компониец, В.Ф. Абрамов, А.Б. Макаров, А.А. Еременко и многие другие.

Хранилища радиоактивных отходов характеризуются тем, что в них захораниваются радионуклиды, опасность которых весьма велика для окружающей среды; они закладываются на большие периоды своего существования, сотни и тысячи лет. Исследованиям по обоснованию технологии возведения и эксплуатации, проектированию и созданию барьеров безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов посвящены работы ведущих отечественных и зарубежных ученых и специалистов: Б.Ф. Мясоедова, Л.А. Большова, О.В. Крюкова, А.А. Абрамова, И.И. Линге, В.В. Тинина, А.Н. Дорофеева, С.А. Дерябина, С.С. Уткина, А.В. Минина, С.Н. Калмыкова, В.С. Гупало, Е.В. Кузьмина, А.В. Барышева, Р.Б. Шарафутдинова, С.Л. Спешилова, А.В. Понизова, Е.В. Захаровой, В.Т. Сорокина, В.Я. Красильникова, А.В. Глаголева, Р.М. Гатауллина, К.А. Болдырева, В.П. Бейгула, Н.Н. Давиденко, Н.В. Свиридова, И.А. Менделеева, Н.Н. Перегудова, А.В. Демина, А.С. Барина, В.В. Мартынова, С.В. Святцова, В.И. Конусевича, Н.А. Анисимова, А.С. Малинина, В.Я. Шишкина, А.А. Куваева, А.С. Волкова, Ю.В. Трофимовой, С.М. Лашенкова, И.А. Иванова, И.Л. Рыбальченко, Stadler F., Dayal R., Nitsche F., Collin F.W., Droste B., Zeisler P., Volske H., Rodel R., Atkinson A., Niskerson A.K., Kumar A., Roy D.M., Shimooka K., Wadashi Y., Muurinen A., Rantanen J., Ovaskainen R.

Принципы обеспечения безопасности при обращении с РАО в ППЗРО изложены в требованиях НП-055-14 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности». Работа выполнена для условий нескольких проектируемых ППЗРО, включая «Северский» и «Озерский».

Пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов структурно состоит из системы инженерных барьеров, препятствующих распространению ионизирующего излучения, ядерных материалов и радиоактивных веществ во вмещающем породном массиве и окружающей среде. Система инженерных барьеров ППЗРО включает несколько барьеров безопасности (ИББ), (Рис.1).

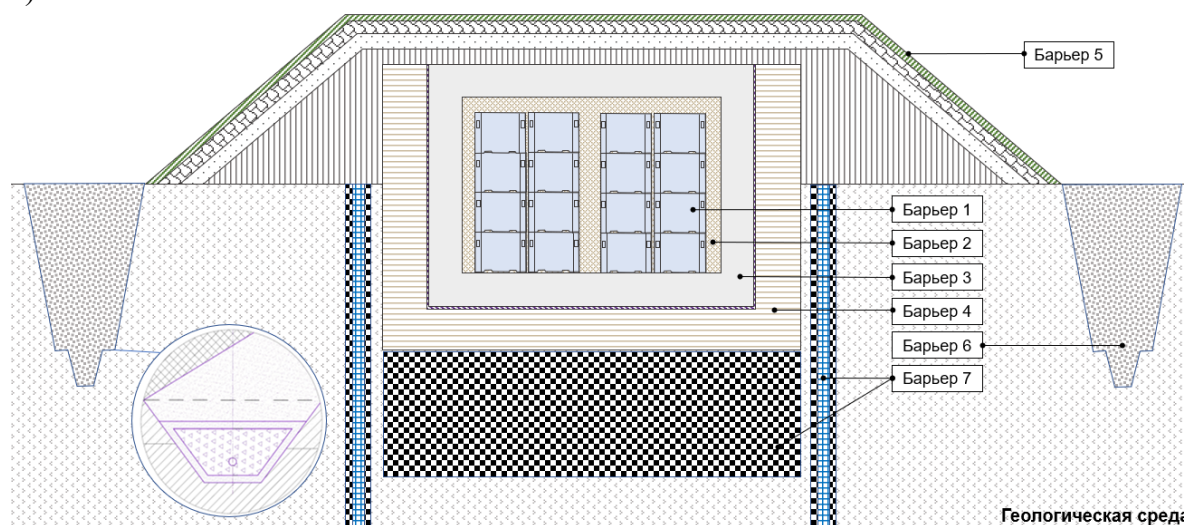


Рисунок 1 - Система инженерных барьеров безопасности ППЗРО: 1 барьер – контейнеры с РАО, 2 барьер – буферный материал на основе природных глин, 3 барьер – бетонные сооружения стен, днища и перекрытий модульного сооружения, 4 барьер – глиняный экран и бентонитовые маты по периметру модульного сооружения, 5 барьер – многослойный покрывающий гидроизолирующий экран, 6 барьер – дренажная система, 7 барьер - шпунтовая и грунтоцементная завесы.

Первый барьер – это выпускаемые по государственным стандартам контейнеры для захоронения РАО типа НЗК, КМЗ, КРАД, ЖБУ, ЖЗК, бочки металлические, фильтр-контейнеры и их аналоги.

Срок службы железобетонных контейнеров, при котором сохраняется их работоспособность как инженерных барьеров (герметичность, механическая прочность) в ППЗРО, составляет не менее 300 лет в условиях захоронения (в соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 51824-2001 «Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из

конструкционных материалов на основе бетона»). Назначенный срок службы металлических контейнеров с учетом потерь на коррозию составляет не менее 30-50 лет (в соответствии с паспортными характеристиками и в зависимости от типа контейнера).

Второй барьер – буферный сыпучий материал на основе природных глин, заполняющий свободное пространство в отсеках модульных сооружений и зазоры между контейнерами. Назначением второго барьера является обеспечение стабильности отсека захоронения РАО, снижение скорости миграции радионуклидов и ограничение доступа воды к контейнерам РАО. Время сохранения барьером изолирующей функции - в течение не менее 300-500 лет.

Третий барьер – бетонные сооружения стен, днища и перекрытий модульных сооружений ППЗРО. Бетонные сооружения составляют основу, несущие конструкции ППЗРО и в период эксплуатации являются одним из главных элементов устойчивости системы захоронения. Срок службы конструкций определяется в соответствии с СП 63.13330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» и ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» и составляет минимум 100 лет.

Четвертый барьер – подстилающий экран и бентонитовые маты по периметру (стены, дно, перекрытие) модульных сооружений ППЗРО, которые предназначены для гидроизоляции объекта, предотвращения вымывания водой, выхода радионуклидов во вмещающие горные породы. Срок сохранения противofильтрационной функции принимается не менее 300-500 лет.

Пятый барьер – покрывающий многофункциональный гидроизолирующий экран, предназначенный для защиты модульных сооружений ППЗРО от атмосферных осадков, состоит из гидроизолирующего, дренажного слоев, защитного слоя из дробленого камня, защитного слоя из суглинка с почвенно-растительным покровом. Сроки выполнения покрывающим экраном изолирующей функции - до 300-500 лет.

Шестой барьер – дополнительный, дренажная система.

Седьмой барьер – дополнительный, шпунтовая и грунтоцементная противofильтрационные завесы, сооружаемые во вмещающих горных породах вокруг модульных сооружений ППЗРО – предмет исследований настоящей работы.

Алгоритм проведения исследований приведен на рисунке 2.

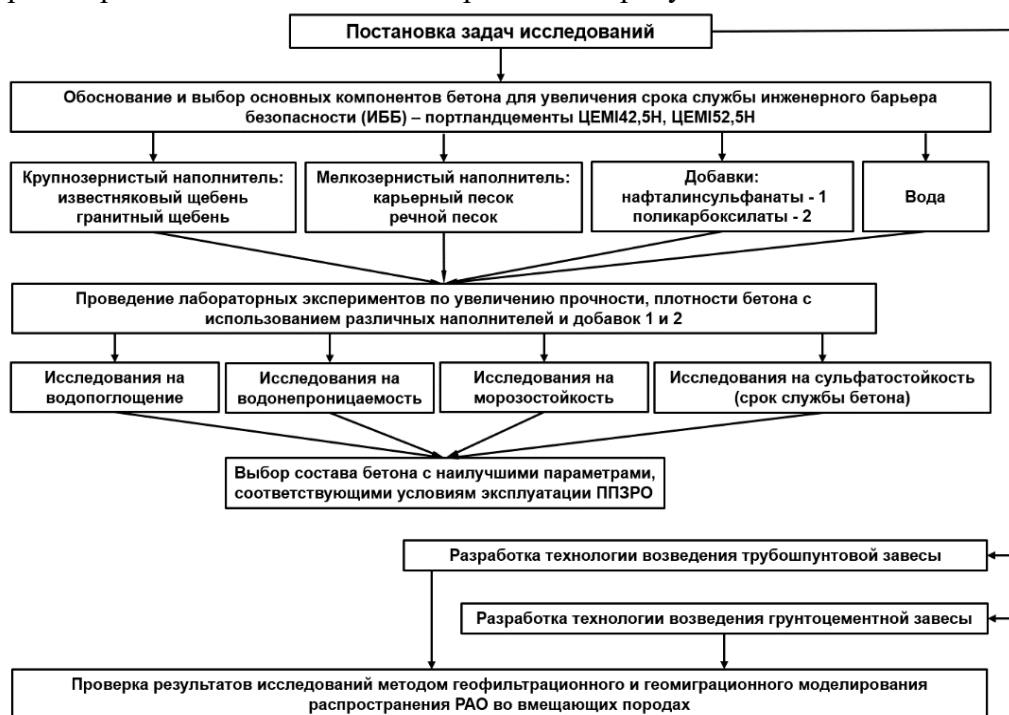


Рисунок 2 - Алгоритм проведения исследований.

Основные результаты исследований отражены в защищаемых положениях. Первое:
- *в условиях глобализации основных составляющих мировой экономики и усиления требований в области обеспечения должного уровня экологической безопасности*

актуализируются стратегические направления проектирования технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, которые в настоящий период недропользования должны быть строго увязаны с использованием конструктивных материалов на основе суперпластифицирующих добавок – нафталинсульфанатов (1) и поликарбоксилатов (2), улучшающих адсорбцию частиц цемента на границе фаз цемент-вода, диспергирование частиц цемента, что обеспечивает получение полной номенклатуры марок бетонов от В7,5 до В70, увеличивает сроки долговременной изоляции пунктов захоронения. При этом усиливается процесс водоредукции в стабилизации изолирующей коллоидной системы бетона, повышается количество сырьевых наполнителей, что, в конечном итоге, приводит к увеличению проектной плотности бетона прямо пропорционально увеличению их дозировки; при добавке нафталиносульфанатов в объеме 1,1-1,3% от массы цемента плотность бетона достигает 2456 кг/м³, снижаются В/Ц с 1,0 до 0,45 и водопоглощение с 14,8 до 3,44%; при добавке поликарбоксилатов в объеме 0,4-0,5% плотность бетона возрастает до 2485 кг/м³, снижаются В/Ц с 0,49 до 0,33 и водопоглощение с 6,5 до 0,97%. При дальнейшем прогнозировании сохранения кризисных явлений в экономическом сегменте проектирование пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом представленных инновационных составляющих приобретает ключевое значение для развития собственных конкурентных преимуществ в экологической среде.

Исследования выполнены экспериментально-аналитическим методом. Длительность службы бетонных сооружений зависит от большого числа факторов, но ключевыми являются прочностные характеристики (сжатие, растяжение), а также плотность, водонепроницаемость, водопоглощение, морозостойкость и сульфатостойкость, позволяющие оценить долговечность конструктивных элементов или сооружения в целом, обеспечить безопасность сооружения в течение всего периода эксплуатации.

Разработка составов и исследования проектных свойств бетонов проведены на лабораторно-исследовательской базе ООО «ЕвроСинтез» (с участием Н.А. Тимергалиева, А.С. Малинина А.С., Е.В. Галактионовой, М.Ю. Токаревой), на образцах бетонов с добавлением суперпластифицирующих добавок нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной природы, на основе двух видов цемента: быстротвердеющего портландцемента марок ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ I 52,5Н. В качестве мелкозернистого наполнителя использован песок карьерный и речной, в качестве крупнозернистого наполнителя использован щебень известняковый и гранитный.

Пластифицирующая добавка на основе модифицированных полимеров нафталинсульфанатов (далее добавка 1) ГОСТ 24211-2008 производства ООО «ЕвроСинтез» имеет следующие технические характеристики (концентрация раствора 40%):

- pH - 6±2; плотность - 1,15±0,03 г/см³; содержание хлорида - <0,1 (EN 480-10) %;
- содержание щелочи - <01 (EN 480-12) %;
- удельная эффективность естественных радионуклидов – не более 370 Бк/кг.

Высокоэффективный суперпластификатор на основе модифицированных поликарбоксилатов (далее добавка 2) ГОСТ 24211-2008 производства ООО «ЕвроСинтез» со следующими техническими характеристиками (концентрация раствора 40,7%):

- pH - 6±2; плотность - 1,04±0,03 г/см³; содержание хлорида - <0,1 (EN 480-10) %;
- содержание щелочи - <01 (EN 480-12) %;
- удельная эффективность естественных радионуклидов – не более 370 Бк/кг.

Исследование прочности бетонов на сжатие. Первая серия экспериментов проведена для установления связи между прочностью и классом бетона для новых, получаемых в настоящей работе бетонных смесей.

Определение класса по прочности на сжатие новых составов бетона проведено по методике, приведенной в ГОСТ 10180, на образцах-кубах размерами 100х100х100 мм³ в промежуточном (3, 7 суток) и проектном (28 суток) возрасте.

Дерево решений (блок-схема алгоритма) по разработке и исследованию бетонов на основе двух суперпластифицирующих добавок, двух видов цемента и 4 видов наполнителей приведено на рисунке 3.

Результаты комплекса лабораторных исследований приведены в диссертации; в силу большого объема данных они вынесены в табличные формы в Приложения. Результаты измерения физико-механических характеристик бетонов приведены в таблице 2 Приложения Б.

На рисунках 4 а) и б) приведен равномерный вклад компонентов бетона в процесс набора прочности исследуемых образцов бетона классов В7,5-30. Модификация бетонной смеси с щебнем известняковым путем замены песка карьерного на речной, применения добавок на основе нафталинсульфанатов и поликарбоксилатов привели к существенному увеличению набора прочности образцов бетона с пределом прочности на сжатие 43,9 МПа (ЦЕМІ52,5Н+(КІВІП)) и 43,5 МПа (ЦЕМІ52,5Н+(РІВІП)), что соответствует классу бетона В35. (Обозначения сокращений – см. Рис.3).

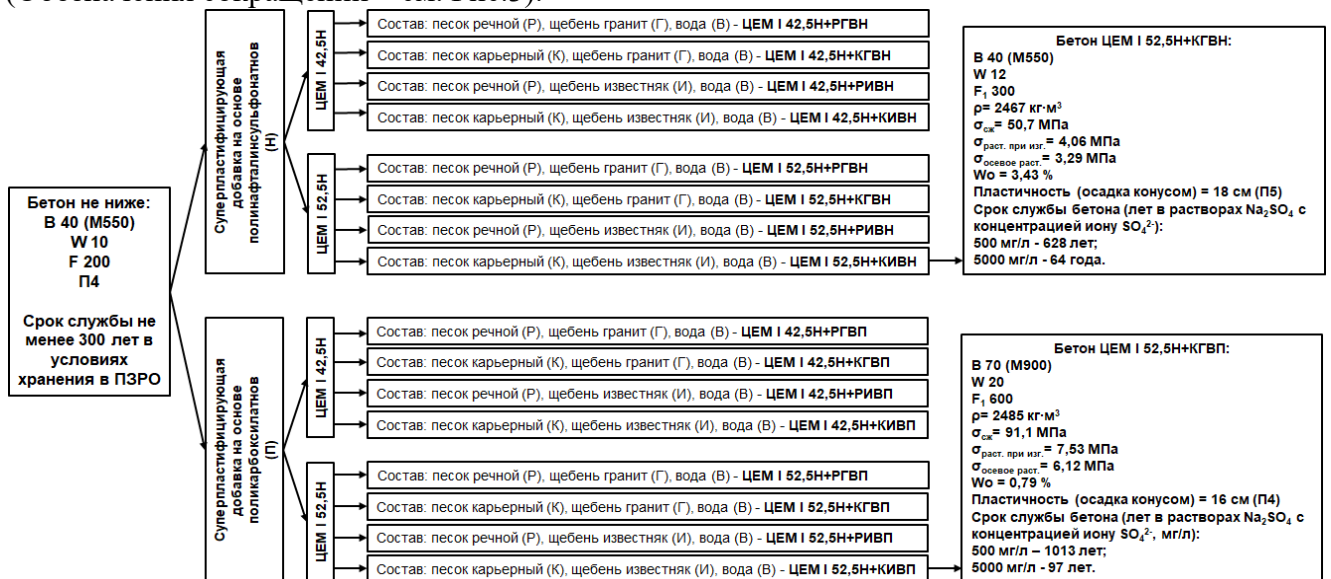


Рисунок 3 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по разработке и исследованию бетонов на основе двух суперпластифицирующих добавок, двух видов цемента и 4 видов наполнителей.

На рисунках 4 а) и б) приведен равномерный вклад компонентов бетона в процесс набора прочности исследуемых образцов бетона классов В7,5-30. Модификация бетонной смеси с щебнем известняковым путем замены песка карьерного на речной, применения добавок на основе нафталинсульфанатов и поликарбоксилатов не привела к существенному увеличению набора прочности, кроме двух образцов бетона с пределом прочности на сжатие 43,9 МПа (ЦЕМІ52,5Н+(КІВІП)) и 43,5 МПа (ЦЕМІ52,5Н+(РІВІП)), что соответствует классу бетона В35.

Замена речного песка на карьерный привела к увеличению прочности бетона на ≈ 0,5-1 МПа на 3 сутки по сравнению с образцами с применением речного песка, на 7 сутки разница составила ≈ 1 МПа, на 28 сутки образцы, изготовленные с применением мытого карьерного песка показали прочность на 1-1,5 МПа больше, чем у образцов с речным песком.

В зависимостях, представленных на рисунках 4 в) и г) показано разное течение процессов, протекающих при отверждении образцов. Так, на рисунке 4 в) видно эффективное взаимодействие добавок 1 и 2 с вяжущим, стабилизация коллоидной системы происходит при меньших количествах жидкого наполнителя, водоцементное отношение В/Ц образцов бетона классов В7,5-40 изменяется от 1 до 0,45, кроме образцов бетона составов ЦЕМІ42,5Н+(КГВП), ЦЕМІ52,5Н+(КГВП).

Применение пластифицирующей добавки 2 позволило получить образцы бетона классов от В30 до В70 с водоцементным отношением В/Ц равным от ~0,5 до ~0,3, возросшие показатели прочности в промежуточном и проектном (28 сутки) возрасте отражают влияние добавки 2.

Замена щебня известнякового на гранитный в образцах с вяжущим ЦЕМ I 42,5Н и одинаковым составом других компонентов приводит к увеличению прочности на 3 сутки от 1,0 МПа до 4,2 МПа (у образцов бетона класса В7,5 разница прочности составляет 26%, бетона классов В10 - 40%, бетона класса В12,5 - 36%, бетона классов В15-30 - 16-28%). Замена крупнозернистого наполнителя позволила получить два состава бетона, соответствующих классам (маркам) В35 ($\sigma_{сж}=18,8$ МПа) и В40 ($\sigma_{сж}=24,1$ МПа).

Применение гранитного щебня и вяжущего ЦЕМ I 42,5Н позволило получить образцы бетона, соответствующие классам В30-В70 (прирост $\sigma_{сж}$ на 3 сутки у всех образцов бетона 59-66% от проектного, на 7 сутки - 90-96% от проектного и на 28 суток - 100-110% от проектного по классу бетона).

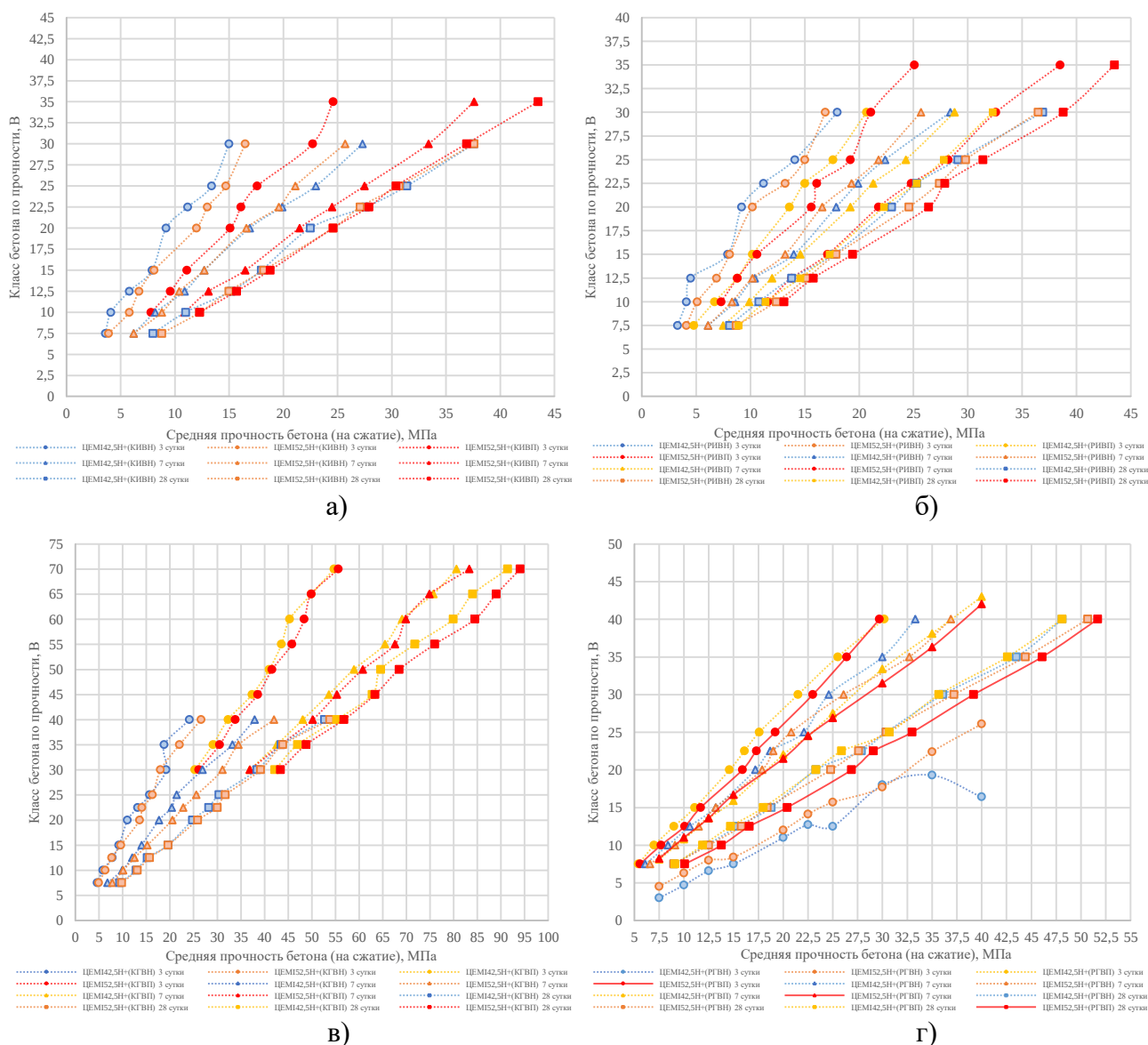


Рисунок 4 - Зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие бетона. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

Замена известнякового щебня на гранитный у образцов на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н открывает возможность получения всех классов бетона, от В7,5 до В70. Образцы с известняковым щебнем позволяют получить бетон классов В7,5-В35, образцы с гранитным щебнем - бетон классов В30-В70, следовательно анализу влияния смены наполнителя могут быть привлечены два образца классов В30 и В35, так как присутствуют у обоих наполнителей.

Причиной резкого увеличения $\sigma_{сж}$ являются особенности структур гранита и известняка. Их пористость и водопоглощение различаются практически в 2 раза, что приводит к более эффективной «работе» добавки 2 с цементом. Заполняемых пор у гранитного щебня меньше, и как следствие, больше частиц цемента провзаимодействует с мелким наполнителем.

На рисунке 5 приведены зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие бетона, которые показывают влияние добавок различной природы на процесс набора прочности при одних и тех же компонентах образцов бетона. Как видно из данных зависимостей, стабилизация коллоидной системы с применением добавки 1 позволяет получить максимальную прочность образцов 55,8 МПа, что соответствует бетону класса В40. Применение добавки 2 позволяет получить максимальную прочность образцов 94,1 МПа, что соответствует бетону класса В70. В таблице 1 приведены некоторые наиболее явные показатели прочности образцов на сжатие при использовании добавок 1 и 2, с крупнозернистым наполнителем - известняковым и гранитным щебнем.

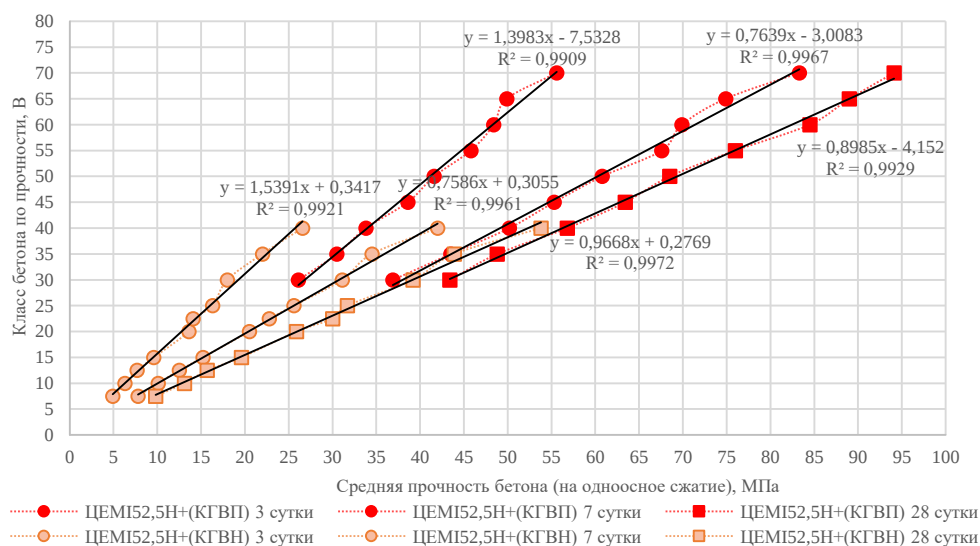


Рисунок 5 - Зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие, при использовании нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Таблица 1. Показатели прочности образцов на сжатие при использовании добавок 1 и 2, с известняковым и гранитным щебнем.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа
с известняковым щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2376	8-37,6	-	-
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2176-2377	8,1-36,9	2169-2335	8,9-32,3
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2139-2335	8,8-37,6	2139-2335	12,3-43,5
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2457	8,7-36,5	2139-2335	13,1-43,5
с гранитным щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2456	9,4-52,7	2389-2486	42,2-91,4
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206-2467	9-48,1	2169-2423	9,1-48,1
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2175-2456	9,8-53,8	2139-2159	43,4-94,1
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2467	9,0-50,7	2178-2335	10,1-51,7

Анализ зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе. Определение класса прочности на растяжение при изгибе новых создаваемых составов бетона проводилось по методике ГОСТ 10180 на образцах-призмах размерами 100x100x400 мм³. Результаты измерений прочности на растяжение при изгибе в проектном возрасте по ГОСТ 10180 приведены в диссертации (таблица 2 Приложения Б).

На рисунке 6 представлены зависимости, показывающие пластическую растяжимость бетона перед началом его разрушения. Как видно из рисунков 5 а), б), состав из мелкого

зернистого наполнителя (песка карьерного и речного) и вяжущего ЦЕМІ42,5Н с добавкой 1 даёт эффект роста прочности у образцов бетона классов В7,5-В20 с карьерным песком от 2 до 16% ($\sigma_{\text{раст при изг}}$ увеличена на 0,04-0,15 МПа), у образцов бетона классов В22,5-В25 с речным песком - 2-8% ($\sigma_{\text{раст при изг}}$ увеличена на 0,06-0,18 МПа), другие группы образцов не показали значимой динамики изменения.

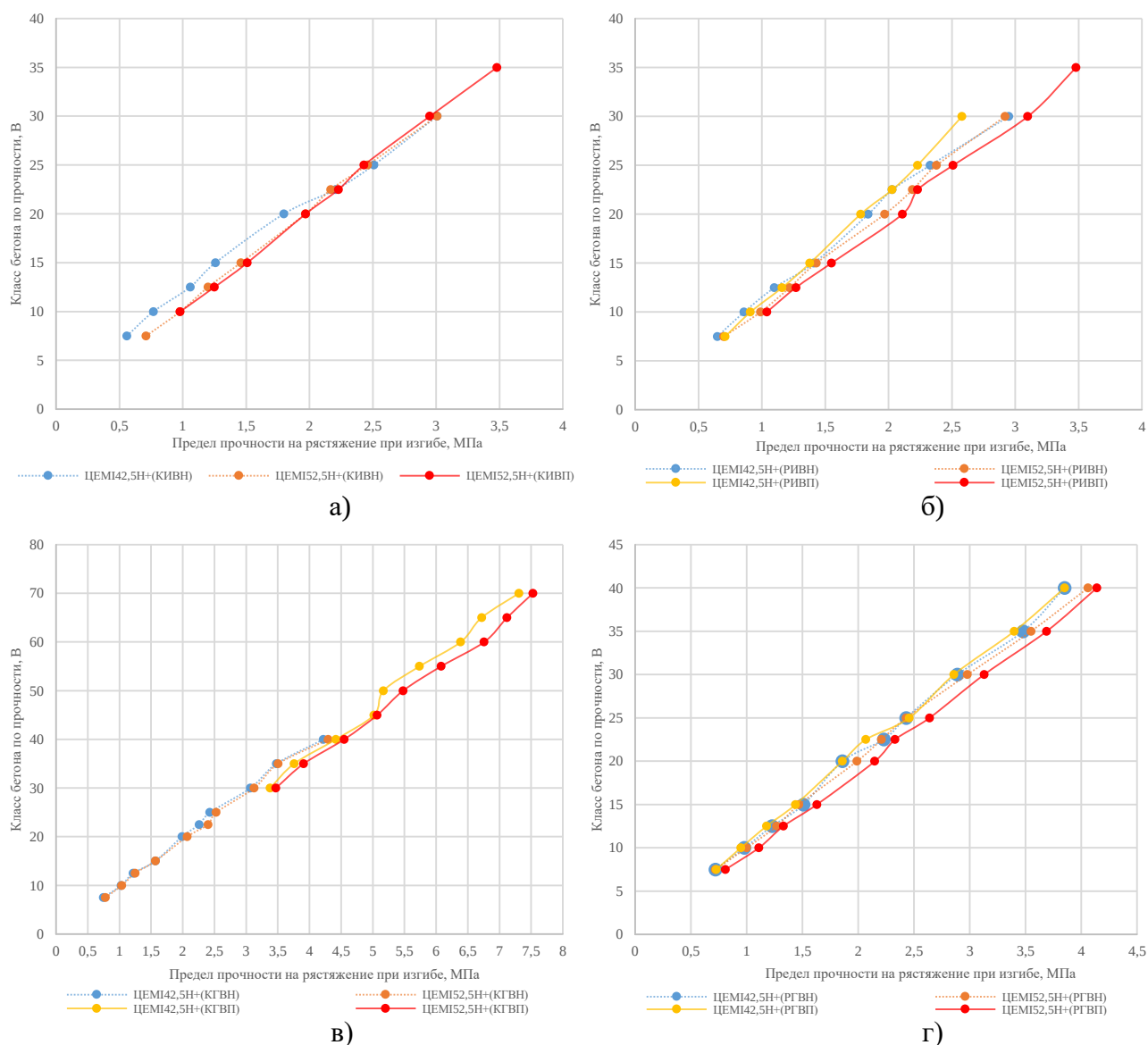


Рисунок 6 - Зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе. Составы с вяжущим марок ЦЕМ І 42,5Н, ЦЕМ І 52,5Н а) КІВН и КІВП, б) РІВН и РІВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

При использовании вяжущего ЦЕМІ52,5Н с добавкой 1 наблюдается более стабильное взаимодействие с добавкой, и разница показателей прочности у мелкозернистого наполнителя составляет 1-3 % (разница $\sigma_{\text{раст при изг}}$ 0,01-0,09 МПа).

У образцов с карьерным песком – разница в среднем составляет 11% (разница $\sigma_{\text{раст при изг}}$ 0,1 МПа), с речным песком -7% (разница $\sigma_{\text{раст при изг}}$ 0,08 МПа). Причиной данных неравномерных изменений по классам бетона явилось наличие илистых включений в партии промытых крупных насыпных исходных материалов, что повлияло на адсорбцию частиц цемента на границе фаз цемент-вода.

На рисунках 6 а), в) показано влияние крупного наполнителя (щебня известнякового и гранитного) в составе образцов бетона с цементом ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н на их прочность. В образце с ЦЕМІ42,5Н замена крупного наполнителя (щебня известнякового на гранитный) с

добавкой 1 обеспечивает получение образцов бетона классов В7,5-В30, увеличение прочности составляет 10-30 % (на 0,5 МПа - 0,30 МПа) от средней прочности бетона. Замена вяжущего ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н с теми же составами даёт увеличение прочности на 3-10% (на 0,05 МПа – 0,1 МПа).

В случае с бетоном класса В30 увеличение $\sigma_{\text{раст}}$ при изг в результате замены щебня известнякового на гранитный составляет 17% (0,52 МПа), у бетона класса В35 - 12% (0,43 МПа) от средней прочности бетона. В связи с отсутствием серии образцов ЦЕМІ42,5Н+(КИБП), образцы серии ЦЕМІ42,5Н+(КГВП) сравниваем с серией ЦЕМІ52,5Н+(КГВП), результаты имеют разницу от 2,5% до 6% (от 0,05 МПа до 0,4 МПа). Причиной роста $\sigma_{\text{раст}}$ при изг является особенность структуры гранита, позволяющая более эффективно взаимодействовать добавке 2 с цементом и наполнителями.

На рисунках 6 в), г) показано влияние крупного наполнителя (гранитного щебня) на упругие свойства образцов бетона с добавками 1 и 2. Добавка 1 обеспечивает получение бетона классов В7,5-В40 со стабильными показателями и незначительными отличиями при замене вяжущего ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком (разница прочности составляет 2-4%, т.е. 0,01-0,08 МПа) и речным (разница прочности составляет 2-5%, т.е. 0,01-0,1 МПа).

Замена добавки 1 на 2 с идентичными составами приводит к аналогичному изменению, как и в случае $\sigma_{\text{сж}}$. Изменение цемента (ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н) в составах с речным песком приводит к увеличению $\sigma_{\text{раст}}$ при изг на величину от 7,5% до 15% (от 0,08 МПа до 0,3 МПа); в составах с карьерным песком $\sigma_{\text{раст}}$ при изг увеличивается от 2,5% до 6% (от 0,09 МПа до 0,4 МПа).

Зависимости, представленные на рисунке 7, показывают влияние нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок на формирование прочности на растяжение при изгибе образцов с компонентами составов ЦЕМІ52,5Н+(КГВН), ЦЕМІ52,5Н+(КГВП). Эти два состава, представляющие лучшие показатели прочности, оба с добавлением промытого карьерного песка и гранитного щебня.

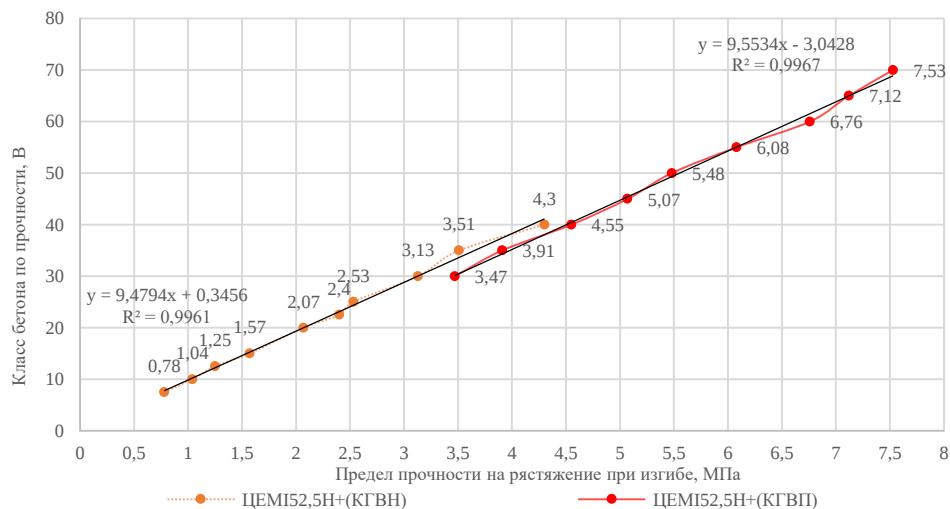


Рисунок 7 - Зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе, с использованием нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Добавка 1 в комбинации с вяжущим ЦЕМІ52,5Н обеспечивает получение образцов с $\sigma_{\text{раст}}$ при изг от 0,78 МПа до 4,3 МПа, что соответствует бетонам класса В7,5-В40. Применение 1,1% добавки (от массы цемента) с увеличением вяжущего с шагом в 20 кг позволило достичь увеличение прочности $\sigma_{\text{раст}}$ при изг в среднем 0,26 МПа и получить образцы класса В7,5-В15. Для получения образца класса В20 с применением 1,1% добавки пришлось увеличить объём вяжущего до 30 кг, что обеспечило увеличение $\sigma_{\text{раст}}$ при изг на 0,5 МПа.

Для увеличения динамики роста прочностных свойств бетона доля добавки 1 была увеличена до 1,3%, прибавление вяжущего составило 30 кг, получены образцы бетона класса В30 (прирост $\sigma_{\text{раст}}$ при изг 0,6 МПа), бетона класса В35 (прирост $\sigma_{\text{раст}}$ при изг 0,38 МПа). Увеличение добавки до 1,3%, обеспечило получение образца бетона класса В40 (прирост $\sigma_{\text{раст}}$ при изг 0,8 МПа).

Добавка 2 в комбинации с вяжущим ЦЕМІ52,5Н обеспечивает получение образцов $\sigma_{\text{раст при изг}}$ от 3,47 МПа до 7,53 МПа, что соответствует бетону классов В30-В70. Состав обеспечивает повышенную прочность при сооружении стен, днища и покрывающего экрана модульного сооружения ППЗРО, что является доказательством первого положения.

В таблице 2 приведены некоторые показатели прочности образцов на растяжение при изгибе, при использовании добавок 1 и 2, с известняковым и гранитным щебнем.

Таблица 2. Показатели прочности образцов на растяжение при изгибе, при использовании добавок 1 и 2, с известняковым и гранитным щебнем.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	$\sigma_{\text{раст при изг}}$, МПа	ρ , кг/м ³	$\sigma_{\text{раст при изг}}$, МПа
с известняковым щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2376	0,52-2,45	-	-
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2176-2377	0,65-2,95	2169-2335	0,71-2,58
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2139-2335	0,71-3,01	2139-2335	0,98-3,48
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2457	0,7-2,92	2139-2335	1,04-3,48
с гранитным щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2456	0,75-4,22	2389-2486	3,38-7,31
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206-2467	0,72-3,85	2169-2423	0,73-3,85
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2175-2456	0,78-4,3	2139-2159	3,47-7,53
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2467	0,72-4,06	2178-2335	0,81-4,65

Определение плотности бетона проведено на образцах-кубах размерами 100х100х100 мм³ в состоянии нормальной влажности, по методике ГОСТ 12730.1-2020 экспериментально-аналитическим методом. Результаты измерений плотности и других параметров бетона при проведении экспериментов приведены в диссертации (таблица 2 Приложения Б).

На Рис. 8 а), б) приведены графики, показано влияние замены мелкого зернистого наполнителя (карьерного песка на речной) при двух сценариях: при замене цемента (ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н) и замене добавки 1 на 2.

Как видно из рисунка 8 а), карьерный песок позволяет получить стабильные и идентичные показатели плотности при замене вяжущего ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н, с получением образцов бетона классов от В7,5 до В35 (плотность ρ = от 2176 – до 2377 кг/м³), и уменьшением водоцементного (В/Ц) отношения у бетона В7,5 (с плотностью ρ =2176 кг/м³). Стабильность в снижении В/Ц отношения обусловлена работой добавки 1 у бетона класса В7,5 - 1,2%, у бетона класса В30 - 1,4% от массы цемента, что обеспечило качество получаемой бетонной смеси образцов. Так как данная добавка является водоредуцирующей, она активно влияет на сокращение количества используемой воды при сохранении нужной подвижности бетонной смеси. Замена карьерного песка на речной ограничивает получение образцов бетонов максимум до класса В30. Применение добавки 1 позволяет получить бетон класса В7,5 с плотностью ρ =2139-2235 кг/м³ при В/Ц= 0,88 – 0,49 у образцов с вяжущим ЦЕМІ42,5Н и В/Ц=0,93-0,5 у образцов с ЦЕМІ52,5Н.

Применение добавки 2 и разных вяжущих позволяет получить при одинаковых уровнях плотности образцы бетона разного класса:

у образцов с вяжущим ЦЕМІ42,5Н:

класс В7,5, с ρ =2139 кг/м³ (В/Ц= 0,98, добавка 0,5% от объема цемента),

класс В30, с ρ =2335 кг/м³ (В/Ц =0,54, добавка 0,6%),

у образцов с вяжущим ЦЕМІ52,5Н:

класс В10, с ρ =2139 кг/м³ (В/Ц =0,98, добавка 0,4%),

класс В35, с ρ =2335 кг/м³ (В/Ц= 0,54, добавка 0,4%).

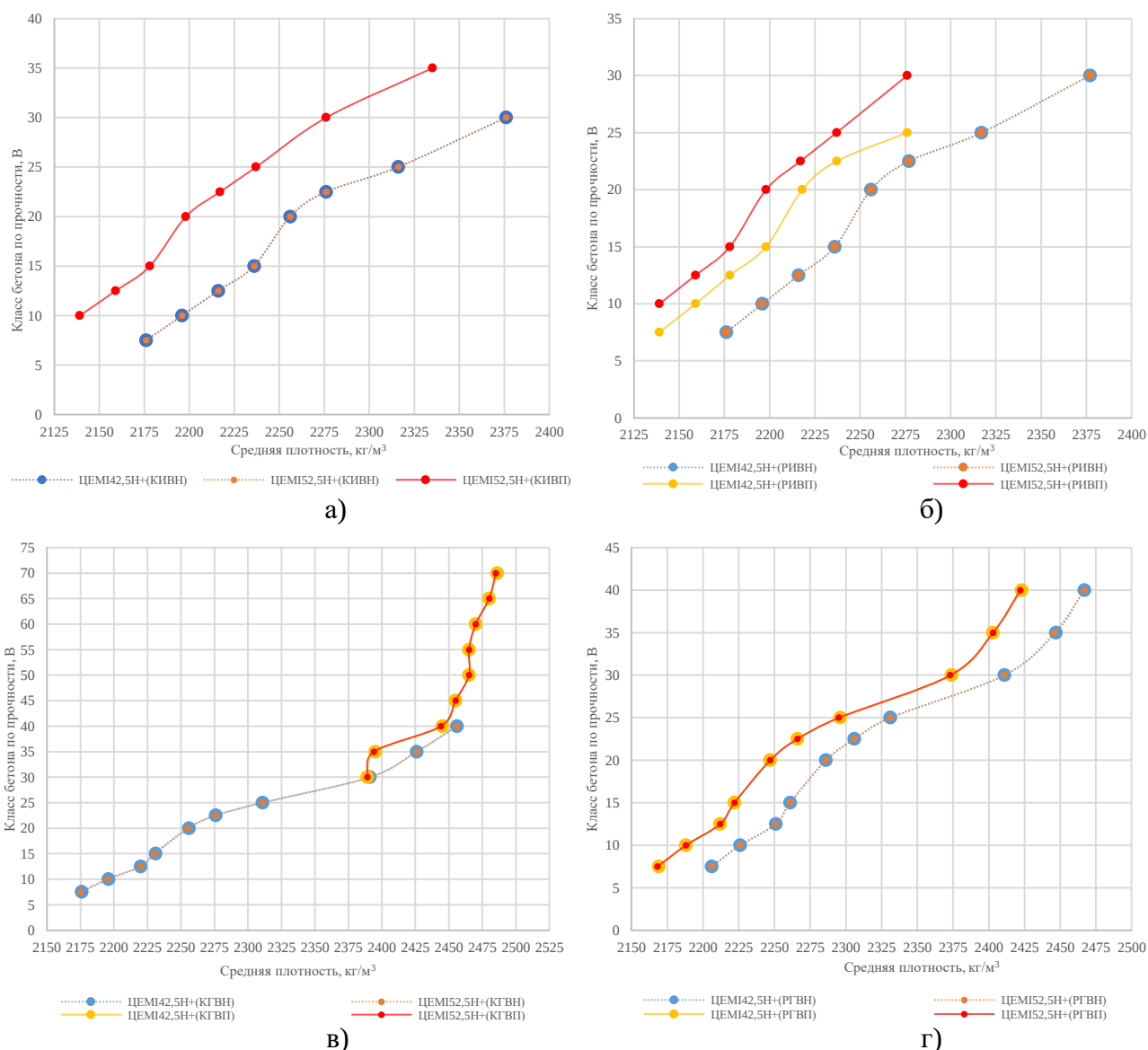


Рисунок 8 - Зависимости класса бетона от средней плотности бетона. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н: а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП. (Обозначения сокращений – см. Рис.2).

Как видно из рисунка 8 а), карьерный песок позволяет получить стабильные и идентичные показатели плотности при замене вяжущего ЦЕМ I 42,5Н на ЦЕМ I 52,5Н, с получением образцов бетона классов от В7,5 до В35 (плотность ρ от 2176 – до 2377 кг/м³), и уменьшением водоцементного (В/Ц) отношения у бетона В7,5 (с плотностью ρ =2176 кг/м³). Стабильность в снижении В/Ц отношения обусловлена работой добавки 1 у бетона класса В7,5 - 1,2%, у бетона класса В30 - 1,4% от массы цемента, что обеспечило качество получаемой бетонной смеси образцов. Так как данная добавка является водоредуцирующей, она активно влияет на сокращение количества используемой воды при сохранении нужной подвижности бетонной смеси.

Замена карьерного песка на речной ограничивает получение образцов бетонов максимум до класса В30. Применение добавки 1 позволяет получить бетон класса В7,5 с плотностью ρ =2139-2235 кг/м³ при В/Ц= 0,88 – 0,49 у образцов с вяжущим ЦЕМ I 42,5Н и В/Ц=0,93-0,5 у образцов с ЦЕМ I 52,5Н.

Применение добавки 2 и разных вяжущих позволяет получить при одинаковых уровнях плотности образцы бетона разного класса:
у образцов с вяжущим ЦЕМ I 42,5Н:

класс В7,5, с $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$ (В/Ц= 0,98, добавка 0,5% от объема цемента),
 класс В30, с $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$ (В/Ц =0,54, добавка 0,6%),
 у образцов с вяжущим ЦЕМІ52,5Н:

класс В10, с $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$ (В/Ц =0,98, добавка 0,4%),
 класс В35, с $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$ (В/Ц= 0,54, добавка 0,4%).

На графиках Рис. 8 в), г) приведены зависимости изменения плотности бетона от фактора замены крупного зернистого наполнителя. Замена известнякового щебня на гранитный приводит к эффекту, как и с карьерным песком, стабильным и практически идентичным показателям плотности у образцов с вяжущим ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, но при другом В/Ц отношении.

Применение добавки 1 позволяет получить с применением вяжущего ЦЕМІ42,5Н образцы бетона классов от В7,5 до В40 (таблица 3). Применение добавки 2 показало аналогичную природу процесса у образцов бетона классов от В30 до В70 на промытом карьерном песке. В таблице 3 приведены некоторые наиболее явные показатели изменения плотности бетона при замене крупного известнякового щебня на гранитный, при добавках 1 и 2.

Таблица 3. Изменение плотности бетона при замене крупнозернистого известнякового щебня на гранитный, использовании добавок 1 и 2.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	Wo	ρ , кг/м ³	Wo
с известняковым щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176	0,94	2389	0,49
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206	1,3	2169	1,03
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2175	1	2389	0,49
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206	1	2168	1,03
с гранитным щебнем				
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2456	0,44	2486	0,33
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2457	0,44	2433	0,48
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2456	0,45	2485	0,33
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2457	0,45	2422	0,48

На графиках рисунка 9 показано влияние плотности бетона на класс бетона при использовании нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

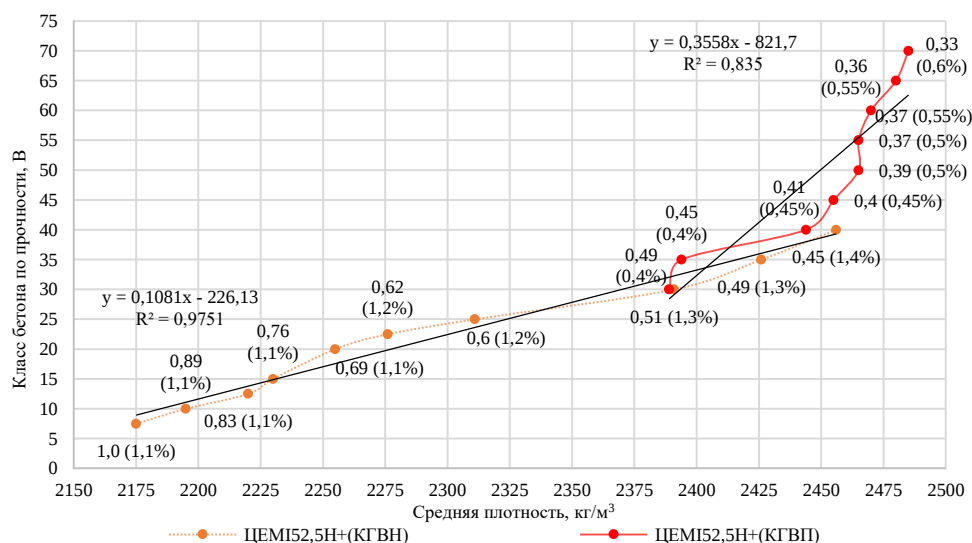


Рисунок 9 - Зависимости класса бетона от средней плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Применение нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок позволяет изменить процесс водоредукции в процессе стабилизации коллоидной системы бетона и увеличить

количество исходных сырьевых материалов, применяемых в 1 м³ бетона. Увеличение плотности образцов бетона с применением добавок происходит прямо пропорционально увеличению их дозировки, в (%) от массы цемента. Это в свою очередь даёт возможность менять В/Ц отношение и увеличивать долю вяжущего (и компонентов) в 1 м³ бетона.

В образцах с применением добавки 1 плотность бетона составляет 2175-2456 кг/м³, их отношение В/Ц = 1,0-0,45, доля добавки 1,1%-1,3%.

В образцах с применением добавки 2 плотность бетона составляет 2389-2485 кг/м³, их отношение В/Ц = 0,49-0,33, доля добавки 0,4%-0,5%.

Определение влияния средней плотности бетона на водопоглощение. Определение водопоглощения (Wo) составов бетона проводилось на образцах-кубах размерами 100x100x100 мм³ в соответствии с методикой ГОСТ 12730.3-2020. Результаты лабораторных испытаний на водопоглощение приведены в диссертации (таблица 2 Приложения Б).

На рисунке 10 показана способность образцов бетона с разным уровнем плотности поглощать влагу, с учётом его структурных особенностей (капиллярно-пористого строения).

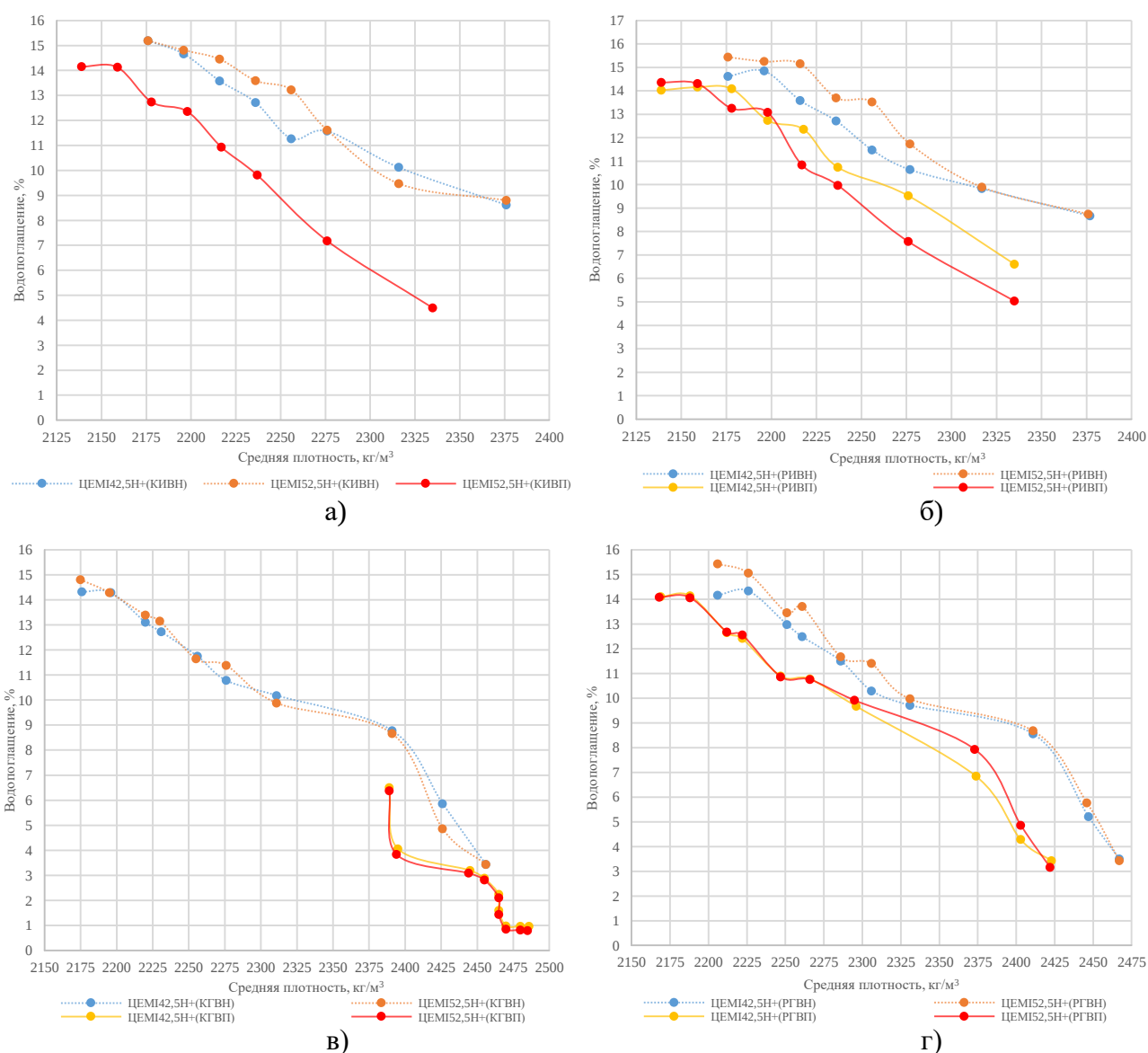


Рисунок 10 - Зависимости водопоглощения бетона от плотности на основе нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

На графиках Рис. 10 а), б) приведены зависимости гигроскопического водопоглощения образцов бетонов с известняковым щебнем. Известняк обладает пористостью 5,4-7,3%, водопоглощением ~2,5%, это в свою очередь работает, дополнительно увеличивая объём насыщения влагой образцов при испытаниях (таблица 2 Приложения Б).

Образцы на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с применением добавки 1 обладают плотностью $\rho=2176-2377 \text{ кг/м}^3$ и $W_o=15-8,5\%$ (Некоторые показатели приведены в таблице 4).

Применение добавки 2 позволило получить более плотные и гигроскопически стойкие образцы бетона, но показатели W_o достаточно невысокие ввиду физических характеристик известнякового щебня.

Графики рисунков 10 в), г) и таблица 3 свидетельствуют о том, что замена крупнозернистого наполнителя с известнякового на гранитный, обладающий более низкой пористостью (0,2-4%), низким водопоглощением (0,15-1,3%) обеспечила получение более плотных образцов бетона.

Применение добавки 2 совместно с карьерным песком и гранитным щебнем позволило получить образцы с наименьшими показателями водонасыщения, максимальной плотностью и монолитностью, снижающей капиллярный эффект в пористой структуре образцов бетонов (таблица 5).

Таблица 4. Водопоглощение образцов бетонов с известняковым щебнем

Наименование	Добавка 1			Добавка 2		
	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$W_o, \%$	Добавка, %	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$W_o, \%$	Добавка, %
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2376	15,19-8,62	1,1-1,4	-	-	-
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2176-2377	14,62-8,67	1,3-1,5	2169-2335	14,03-6,61	0,5-0,6
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2139-2335	14,03-6,61	1,1-1,4	2139-2335	14,16-4,49	0,4-0,6
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2457	1,0-0,45	1,3-1,5	2139-2335	14,36-5,04	0,4-0,5

Таблица 5. Водопоглощение образцов бетонов с гранитным щебнем.

Наименование	Добавка 1			Добавка 2		
	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$W_o, \%$	Добавка, %	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$W_o, \%$	Добавка, %
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2456	14,32-3,43	1,1-1,4	2389-2486	6,5-0,97	0,4-0,7
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206-2467	14,16-3,43	1,3-1,5	2169-2423	14,1-3,43	0,5-0,6
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2175-2456	14,8-3,44	1,1-1,4	2389-2485	6,38-0,79	0,4-0,6
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2206-2467	15,43-3,43	1,3-1,5	2178-2335	14,08-3,16	0,4-0,5

На графиках Рис. 10, в), г) показано влияние крупнозернистого известнякового и гранитного щебня на водопоглощение образцов бетонов разных классов. Добавка 1 с известняковым щебнем обеспечивает получение образцов классов В7,5-В30. Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущим ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетонов от В7,5 до В70 с наименьшими показателями водопоглощения. Уменьшение водопоглощения происходит с увеличением плотности бетона, заменой известнякового щебня на гранитный, добавками 1 и 2.

На рисунке 11 приведено влияние нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок на показатель водопоглощения бетона. Увеличение плотности образцов бетона с применением добавок приводит к уменьшению процента водопоглощения.

Применение добавки 1 от 1,1% до 1,3% позволяет эффективно понизить общую и капиллярную пористость образцов с ростом плотности от 2176 кг/м^3 до 2386 кг/м^3 и, следовательно, понизить водопоглощение с 15,19% до 8,8%.

Применение добавки 2 в количестве 0,4%-0,5% от массы цемента позволяет достичь более высоких значений плотности $2389-2485 \text{ кг/м}^3$. Стерический эффект, которым обладают молекулы поликарбоксилата, при отверждении образцов бетона приводит к более плотной упаковке

компонентов бетона и, как следствие, эффективной кольматации капилляров. О влиянии стерического эффекта молекул добавки 2 свидетельствуют показатели водопоглощения, которые составляют от 6,38% до 0,79%.

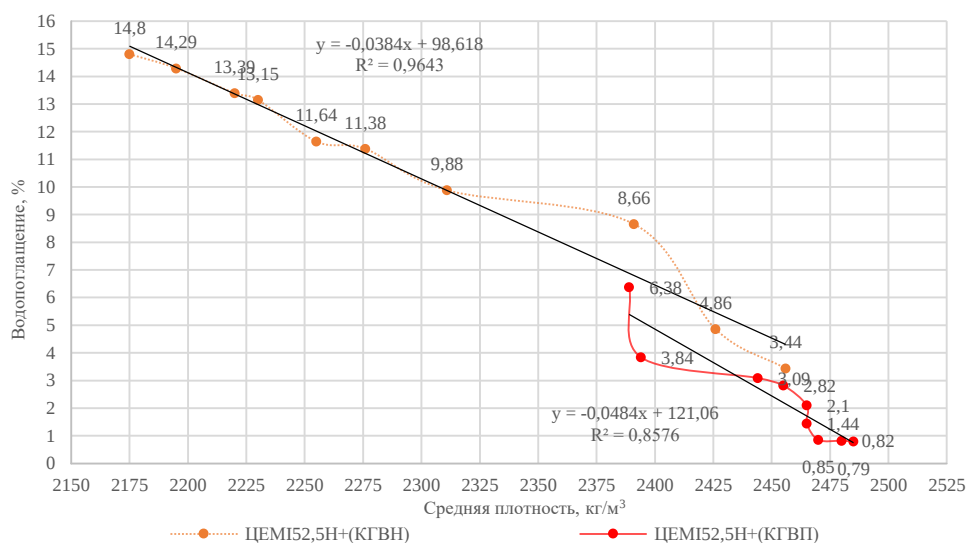


Рисунок 11 - Зависимости водопоглощения бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Второе положение:

- *концепции поэтапного проектирования технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов должна базироваться на совокупности методов и моделей, использование которых в процессе принятия проектных решений позволяет достигнуть симбатного прямо пропорционального увеличения изоляционных возможностей модульного сооружения: водонепроницаемости, морозостойкости и сульфатостойкости проектируемого бетона; применение добавки (1) от 1,1% до 1,4% от массы цемента позволяет получить бетон классов В7,5 - В40 с показателями морозостойкости от F50 до F300, водонепроницаемости от W0 до W12; применение добавки (2) в объёме 0,4%-0,6% позволяет получить бетон классов В30-В70 с показателями морозостойкости от F300 до F600, водонепроницаемости от W8 до W20, что при сокращении объемов бетона при монтаже может увеличить максимальный срок коррозионного разрушения в сульфатной среде до 500-1000 лет, что укладывается в рамки требуемой надежности проектных решений с учетом динамической составляющей среды функционирования.*

Установление влияния средней плотности бетона на водонепроницаемость. Определение марки по водонепроницаемости (W) проведено на образцах-цилиндрах диаметром 150 мм и толщиной 50 мм методом «мокрого пятна» в соответствии с п.4 ГОСТ 12730.5-2018. В диссертации приведены результаты исследований водонепроницаемости образцов. Графики построены по данным измерений, приведенных в таблице 2 Приложения Б.

Из графиков рис. 12 следует, что способность образцов бетона сохранять устойчивость при проникновении воды через поры и капилляры в их структуре идентична процессу гигроскопического влагопоглощения. Большой вклад вносят сырьевые материалы, применяемые при производстве бетона, их пористость влияет на общие показатели водонепроницаемости.

Образцы с известняковым крупнозернистым наполнителем и добавкой 1 обладают плотностью 2176-2376 кг/м³ и водонепроницаемостью W0-W10 (наиболее явные показатели приведены в таблице 6). Применение добавки 2 позволило получить более монолитные образцы, устойчивые к проникновению воды.

Замена крупнозернистого наполнителя с известнякового на гранитный, обладающий более низкой пористостью (0,2-4%), обеспечила получение более плотных образцов бетона (таблица 7).

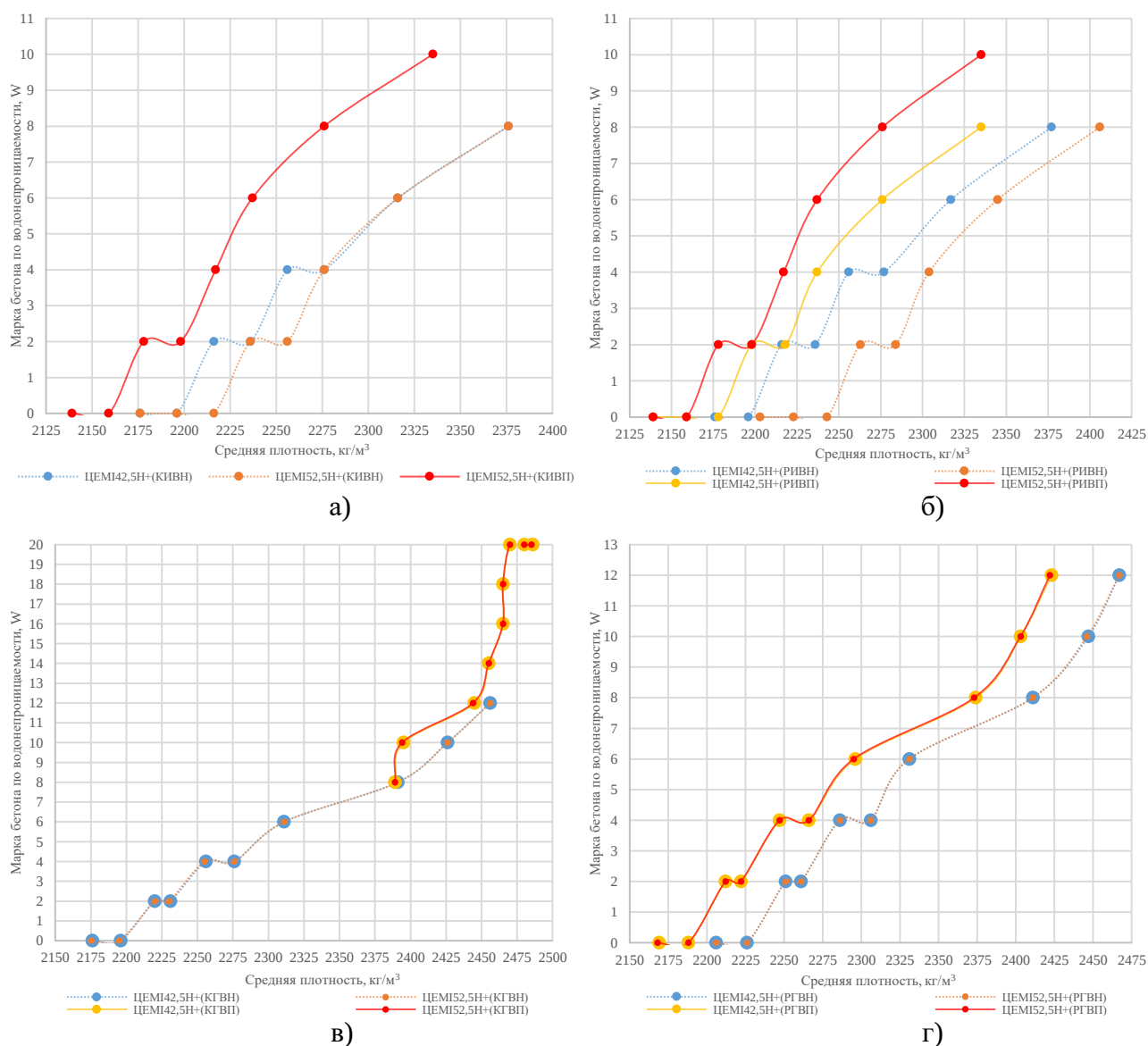


Рисунок 12 - Зависимости водонепроницаемости от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

Таблица 6. Водонепроницаемость бетона с известняковым крупнозернистым наполнителем, использованием добавок 1 и 2.

Наименование	Добавка 1		Добавка 2	
	ρ , кг/м ³	W, ед.	ρ , кг/м ³	W, ед.
ЦЕМ I 42,5Н с карьерным песком	2176-2196	0-8	-	-
ЦЕМ I 42,5Н с речным песком	2216-2376	0-8	2139-2178	0-8
ЦЕМ I 52,5Н с карьерным песком	2176-2216	0-8	2139-2159	0-10
ЦЕМ I 52,5Н с речным песком	2236-2376	0-8	2178-2335	0-10

Таблица 7. Рост водонепроницаемости бетона с гранитным крупнозернистым наполнителем, использованием добавок 1 и 2.

Наименование	Добавка 1		Добавка 2	
	ρ , кг/м ³	W, ед.	ρ , кг/м ³	W, ед.
1	2	3	4	5
ЦЕМ I 42,5Н с карьерным песком	2176-2196	0	2389-2455	8-14
	2220-2456	2-12	2455-2465	14-18

Продолжение таблицы 7.

1	2	3	4	5
			2470-2486	18-20
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206-2226 2251-2467	0 2-12	2212-2423	2-12
			2389-2455	8-14
			2455-2465	14-18
			2470-2486	18-20
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2176-2216	0	2389-2455	8-14
			2455-2465	14-18
			2470-2486	20
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2236-2376	2-10	2169-2188	0
			2112-2422	2-12

Применение гранитного крупнозернистого щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущим ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетонов классов от В7,5 до В70 с наибольшими показателями водонепроницаемости, необходимыми при строительстве ППЗРО (Рис.13).

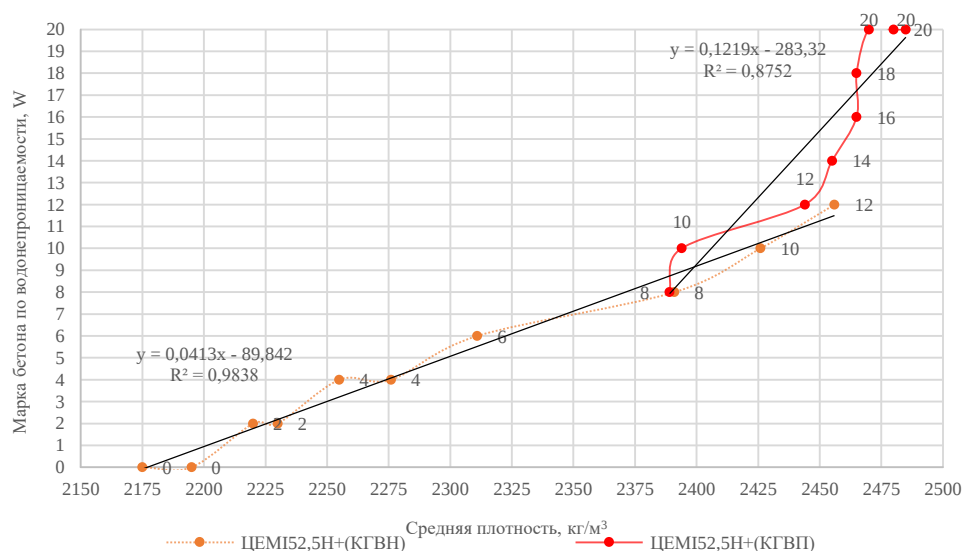


Рисунок 13 - Зависимости водонепроницаемости бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Определение морозостойкости (F) составов бетона. Определение марки по морозостойкости (F) составов бетона проводилось на образцах-кубах размерами 100x100x100 мм³ по методике ГОСТ 10060. Испытания – циклы замораживания и оттаивания, начинались с минимально допустимой по методу марки по морозостойкости (F175) и продолжались до определения фактической марки по морозостойкости (результаты испытаний приведены в диссертации, таблица 3 Приложения Б).

На графиках рис. 14 приведено симбатное изменение водонепроницаемости, морозостойкости и плотности. Это происходит за счёт «работы» добавок 1 и 2, а именно, введение добавки в состав бетона стабилизирует кислород воздуха в виде мицелл и приводит к равномерному распределению воздуха в бетонной смеси у получаемых образцов. Симбатное изменение позволяет произвести бетон с меньшим количеством дефектов, как следствие - проникающая вода в микропоры при гигроскопическом водопоглощении бетона не может пройти глубже и вызвать разрушение бетонной структуры образца при циклах замораживания и оттаивания.

Зависимости на рисунках 14 а), б) представляют изменение морозостойкости бетона при крупнозернистом известняковом щебне и замене мелкозернистого наполнителя.

Испытания образцов с добавками 2 показали подобные результаты. (Некоторые результаты с использованием добавок 1 и 2 приведены в таблице 8).

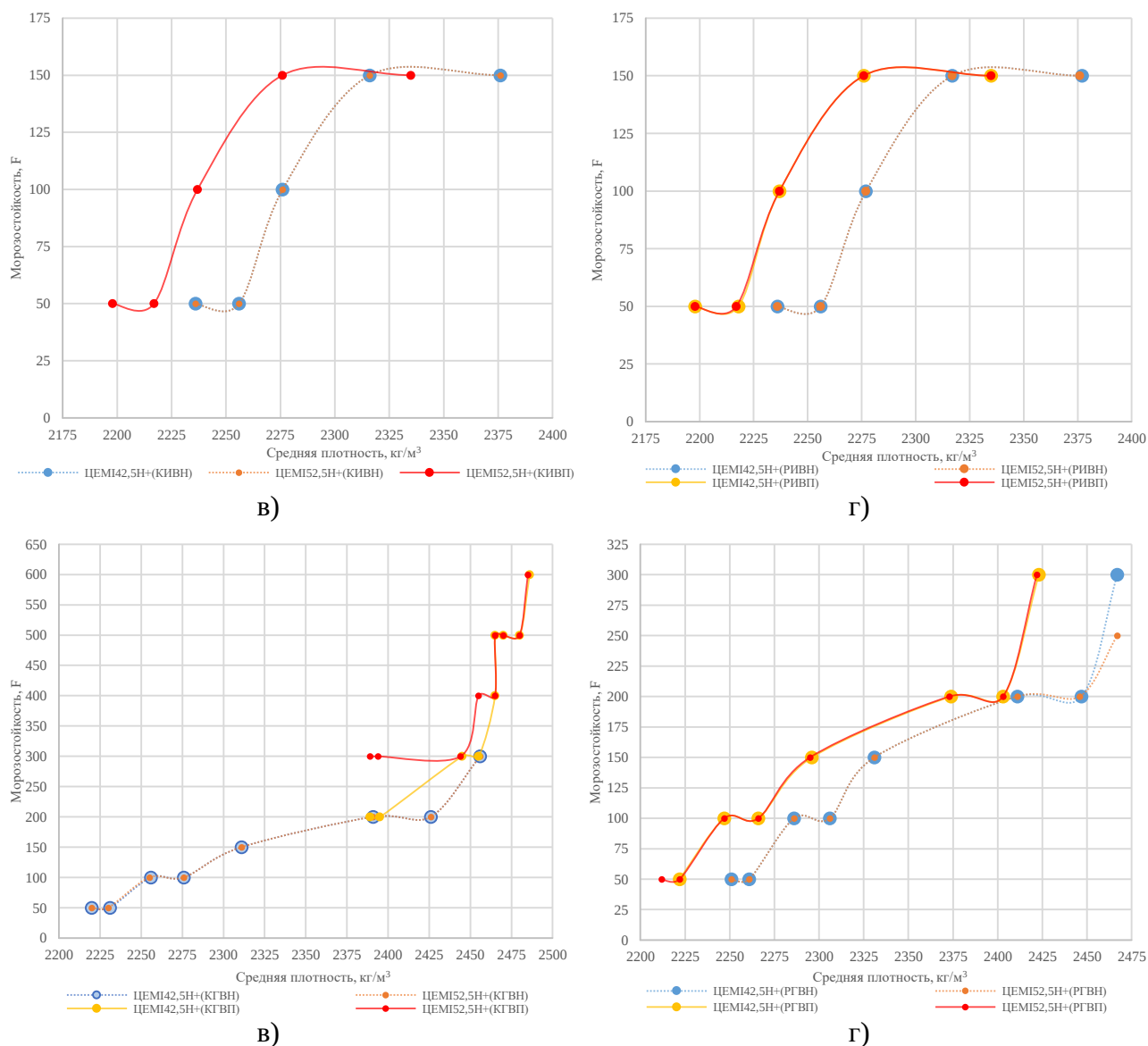


Рисунок 14 - Изменения морозостойкости от плотности бетона на основе нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ І 42,5Н, ЦЕМ І 52,5Н: а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

Таблица 8. Морозостойкость бетона с известняковым крупнозернистым наполнителем, использованием добавок 1 и 2.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	F, ед.	ρ , кг/м ³	F, ед.
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2216	0	2198-2335	50-150
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2236-2376	50-150	2139-2178	0
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2176-2216	0	2139-2159	0
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2236-2376	50-150	2198-2335	50-150

Зависимости на рисунках 14 в), г) иллюстрируют изменение морозостойкости бетона при замене крупного известнякового зернистого наполнителя на гранитный; в некоторых случаях результаты схожи (результаты приведены в таблице 9).

Применение добавки 2 с карьерным песком позволило получить образцы с максимальными показателями морозостойкости F600 на вяжущем ЦЕМІ52,5Н.

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущим ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетона классов от В7,5 до В70 с показателями морозостойкости F50-F600.

Таблица 9. Увеличение морозостойкости бетона с гранитным крупнозернистым наполнителем, использованием добавок 1 и 2.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	F, ед.	ρ , кг/м ³	F, ед.
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2196	0	2389-2455	200-400
	2220-2311	50-150	2465-2480	400-500
	2391-2456	200-300	2484	500
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2206-226	0	2169-2212	0
	2251-2331	200-300	2222-2423	50-300
	2411-2467	200-300		
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2176-2216	0	2389-2455	200-400
			2465-2480	400-500
			2486	600
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2236-2376	50-150	2169-2212	0
			2222-2423	50-300

На графиках Рис. 15 показано влияние добавок 1 и 2 на морозостойкость образцов бетона классов от В7,5 до В70.

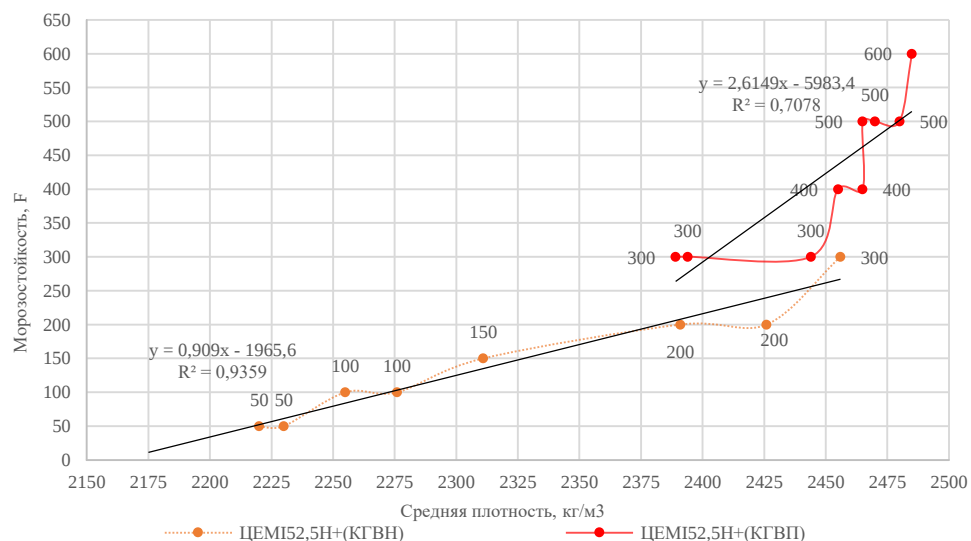


Рисунок 15 - Зависимости изменения морозостойкости бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Увеличение плотности образцов бетона с применением добавок приводит к симбатному увеличению водонепроницаемости и морозостойкости.

Применение добавки 1 от 1,1% до 1,4% позволило получить бетоны классов В7,5-В40 с показателями морозостойкости F50-F300 (ρ =2175-2456 кг/м³, водонепроницаемости от W0 до W12).

Применение добавки 2 в объёме 0,4%-0,6% от массы цемента позволило получить образцы бетона классов В30-В70 с показателями морозостойкости F300-F600, достичь более высоких значений плотности ρ =2389-2485 кг/м³ с показателем водонепроницаемости от W8 до W20.

Оценка сроков службы бетона в сульфатных средах. Повышению качества и долговечности железобетонных конструкций уделяется большое внимание в организациях, производящих бетон для строительства объектов с повышенным уровнем ответственности.

Определение фактических сроков службы бетонных конструкций, повышение коррозионной стойкости бетона и обеспечение долговременной безопасной эксплуатации строительных конструкций является одной из главных задач для объектов, планируемых к длительной эксплуатации при агрессивном воздействии окружающей среды.

Большой вклад в развитие методологии качественного и количественного анализа процессов коррозии бетона и железобетона внесли работы В.М. Москвина, В.В. Кинда, Е.А. Гузеева, Н.В. Савицкого.

Многолетние исследования сульфатной коррозии, проводившиеся в лаборатории коррозии Научно-исследовательского института бетона и железобетона (НИИЖБ) позволили установить, что в условиях диффузии сульфатов в поверхностном слое бетона накапливаются продукты коррозии (гипса и гидросульфатоалюмината кальция), скорость коррозии со временем замедляется. Представлена методика, в которой предложены количественные зависимости, оценивающие процесс коррозии и изменения физико-механических характеристик. Данная методика позволяет прогнозировать скорость коррозионного разрушения бетона только при постоянном воздействии среды определённой концентрации в условиях полного погружения конструкций в жидкую среду. Также в НИИЖБ разработаны рекомендации по методам определения коррозионной стойкости бетона (утверждены 7 апреля 1988 г.), они содержат основные положения методов исследования коррозионной стойкости цементного камня, раствора и бетона в жидких агрессивных средах.

В процессе эксплуатации железобетонных конструкций в сложных гидрогеохимических условиях (вмещающих грунтах) возникает необходимость в оценке возможного коррозионного разрушения бетона и сроков службы рассматриваемых образцов бетонов.

Испытания коррозионной стойкости составов бетонов проведены на образцах-кубах размерами $100 \times 100 \times 100$ мм³ в соответствии с ГОСТ 27677-88, расчёт срока разрушения образцов бетонов в сульфатных средах проведен в соответствии с рекомендациями по методам определения коррозионной стойкости бетонов (приведено в диссертации, таблицы 4,5 Приложения Б).

Результаты исследования влияния сульфатной коррозии, представленные на графиках рис. 16, представляют длительность процесса коррозии, протекающей в бетоне различных классов по прочности, в соответствии с химическим анализом грунтовых вод. Содержание солей сульфатов на территории потенциального размещения ППЗРО принято 500 мг/л.

Из графиков Рис. 16 видно изменение плотности, водонепроницаемости, морозостойкости, их влияние на количество поглощённых сульфатов в образцах бетонов, и как следствие – увеличение срока коррозионного разрушения бетонного камня в агрессивной сульфатной среде, имитирующей условия эксплуатации ППЗРО. Класс бетона используется как интегральный показатель свойств бетона. Снижение показателя водопоглощения с увеличением плотности, водонепроницаемости, морозостойкости приводит к уменьшению критического количества сульфатов, поглощённых растворной частью бетона в образцах и как следствие – увеличению срока службы бетона в сульфатных средах.

Зависимости на Рис. 16 а), б) представляют изменение срока коррозионного разрушения бетонных образцов при замене мелкого зернистого наполнителя. Детальное описание влияния добавок приведено в диссертации.

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущим ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетона классов от В7,5 до В70. Исходя из полученных графиков Рис.16 максимальный срок коррозионного разрушения бетонных образцов в сульфатных средах у образцов бетона ЦЕМІ52,5Н+(КГВН) с добавкой 1 составляет 628 лет, у образцов бетона ЦЕМІ52,5Н+(КГВП) с добавкой 2 составляет 1013 лет.

Увеличение плотности образцов бетона с применением добавок приводит к увеличению морозостойкости и срока службы образцов бетонов в агрессивных средах. (Некоторые показатели зависимости срока службы бетона от плотности приведены в таблицах 10,11).

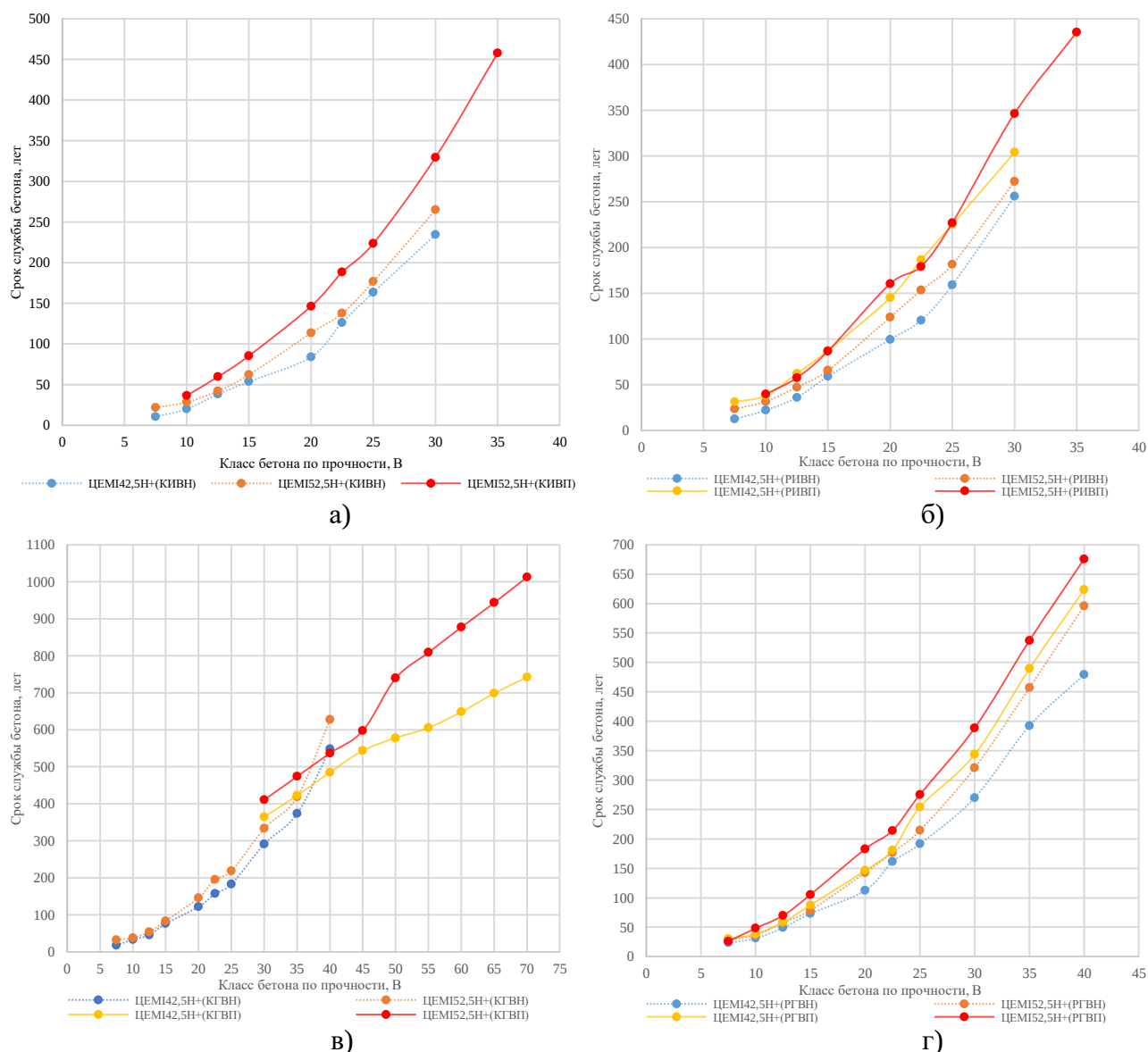


Рисунок 16 - Зависимости срока службы бетона (сульфатной коррозии бетона) от класса бетона по прочности на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП, в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

Таблица 10. Изменение срока службы бетона (до полного разрушения образца) в зависимости от плотности, с использованием добавок 1 и 2, известнякового крупнозернистого наполнителя.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	τ , лет	ρ , кг/м ³	τ , лет
ЦЕМ I 42,5Н с карьерным песком	2176-2216	11-38	-	-
ЦЕМ I 42,5Н с речным песком	2236-2377	59-256	2198-2335	87-304
ЦЕМ I 52,5Н с карьерным песком	2176-2196	22-28	2139-2178	37-85
	2216-2316	42-177	2198-2335	146-458
ЦЕМ I 52,5Н с речным песком	2317-2377	181-272	2139-2178	39-88
			2198-2335	160-435

На рисунке 17 показано влияние увеличения класса бетона на основе добавок 1 и 2 на срок коррозионного разрушения образцов бетона. Применение добавки 1 от 1,1% до 1,4% позволяет получить бетон классов В7,5-В40 ($\rho=2175-2456$ кг/м³) с показателями морозостойкости F50-F300 и сроком службы бетона в агрессивной среде до полного разрушения (τ) от 32 до 628 лет.

Таблица 11. Изменение срока службы бетона (до полного разрушения образца) в зависимости от плотности, с использованием добавок 1 и 2, гранитного крупнозернистого наполнителя.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0,4-0,6%)	
	ρ , кг/м ³	τ , лет	ρ , кг/м ³	τ , лет
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2196	17-33	2389-2455	364-543
	2220-2311	46-182	2486	742
	2391-2456	291-548		
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2331-2467	192-479	2403-2423	489-624
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2391-2456	333-628	2389-2455	411-598
			2465-2480	739-943
			2485	1013
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2411-2467	321-596	2168-2212	26-70
			2222-2422	105-675

Применение добавки 2 в объёме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет получить образцы бетона классов В30-В70 ($\rho=2389-2485$ кг/м³) с показателями морозостойкости F300-F600 и сроком службы бетона в агрессивной среде до полного разрушения (τ) от 411 до 1013 лет.

Применение поликарбоксилатов в сравнении с нафталинсульфатами позволяет повысить адсорбцию частиц цемента на границе фаз цемент-вода, что приводит к более эффективному диспергированию частиц цемента и получению бетона высоких марок по классу прочности. Показатели прочности на сжатие отличаются в 1,6 раза, по классам бетона максимальный показатель прочности на основе добавки 1 - это минимальный показатель прочности у бетонов на основе добавки 2. Применение данных двух добавок позволяет проводить полную номенклатуру марок бетона классов от В7,5 до В70 (при добавке 1 - от В7,5 до В40, при добавке 2 - от В30 до В70).

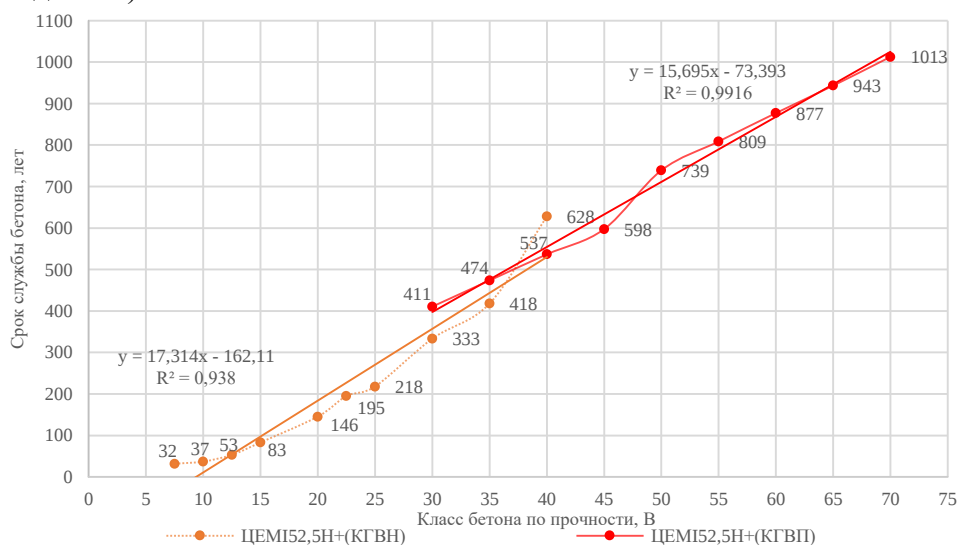


Рисунок 17 - Зависимости срока службы бетона (сульфатной коррозии бетона) от класса бетона по прочности на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

В диссертации приведены сведения по сроку службы бетона (τ), в растворах Na_2SO_4 с различными концентрациями ионов SO_4^{2-} - 500 и 5000 мг/л. Установлена значительная разница в сроках службы бетона в зависимости от концентрации ионов SO_4^{2-} . Для бетона с вяжущим ЦЕМІ42,5Н, составом РГВН, добавкой 1 разница в сроках службы составит 430 лет, для состава РГВП разница в сроках службы составит 560 лет. Для бетона с вяжущим ЦЕМІ52,5Н, составом КГВН, добавкой 1 разница в сроках службы составит 564 года, для состава КГВП разница в сроках службы составит 916 лет.

Концентрация сульфатов в грунтовых водах имеет важное значение при обеспечении долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности, это следует иметь ввиду при

выборе площадок, учитывать их обводненность при проектировании и строительстве ППЗРО.

Применение крупнозернистого гранитного наполнителя с добавкой 2 позволяет увеличить показатели прочности на сжатие образцов бетона на 100-120% на 3, 7 и 28 суток относительно аналогичных составов с добавлением крупнозернистого известнякового наполнителя. Некоторые результаты испытаний бетонов с добавками 1 и 2 приведены в сводных таблицах 12 и 13.

Таблица 12. Параметры бетонов на вяжущем портландцемент ЦЕМ142,5Н, с добавками 1 и 2.

№	Наименование	Класс	Плотность	Прочность на сжатие	Прочность на растяж.	Водопоглощение	Водонепроницаемость	Морозостойкость
		В, ед.	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{раст}$, МПа	W _о , %	W, ед.	F, ед.
КИВ (карьерный песок, известняковый щебень, вода)								
1	Доб.1	7,5-30	2176-2376	8-37,6	0,56-3,01	15,2-8,6	0-8	50-150
	Доб.2	-	-	-	-	-	-	-
РИВ (речной песок, известняковый щебень, вода)								
2	Доб.1	7,5-30	2176-2377	8,1-16,9	0,65-2,95	15,4-8,6	0-8	50-150
	Доб.2	7,5-30	2139-2376	8,9-32,3	0,71-2,58	14-6,6	0-8	50-150
РГВ (речной песок, гранитный щебень, вода)								
3	Доб.1	7,5-40	2206-2467	9-48,1	0,72-3,85	14,2-3,5	0-12	50-300
	Доб.2	7,5-40	2169-2423	9,1-48,1	0,73-3,85	14,1-3,4	0-12	50-300
КГВ (карьерный песок, гранитный щебень, вода)								
4	Доб.1	7,5-40	2176-2456	9,4-52,7	0,75-4,22	14,3-3,4	0-12	50-300
	Доб.2	30-70	2389-2486	42,2-91,4	3,38-7,31	6,5-1	8-20	200-600

Таблица 13. Параметры бетонов на вяжущем портландцемент ЦЕМ152,5Н с добавками 1 и 2.

№	Наименование	Класс	Плотность	Прочность на сжатие	Прочность на растяж.	Водопоглощение	Водонепроницаемость	Морозостойкость
		В, ед.	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{раст}$, МПа	W _о , %	W, ед.	F, ед.
КИВ (карьерный песок, известняковый щебень, вода)								
1	Доб.1	7-30	2176-2376	8,8-37,6	0,71-3,01	15,2-8,8	0-8	50-150
	Доб.2	10-35	2139-2335	12,3-43,5	0,98-3,48	14,1-4,5	0-10	50-150
РИВ (речной песок, известняковый щебень, вода)								
2	Доб.1	7,5-30	2203-2406	8,7-36,5	0,7-2,92	15,4-8,7	0-8	50-150
	Доб.2	10-35	2139-2276	13,1-43,5	1,04-3,48	14,3-5	0-10	50-150
РГВ (речной песок, гранитный щебень, вода)								
3	Доб.1	7,5-40	2206-2467	9-50,7	0,72-3,85	15,4-3,4	0-12	50-250
	Доб.2	7,5-40	2168-2422	10,1-51,7	0,81-4,14	14-3,2	0-12	50-300
КГВ (карьерный песок, гранитный щебень, вода)								
4	Доб.1	7,5-40	2389-2486	9,8-53,8	0,78-4,3	14,8-3,5	0-12	50-300
	Доб.2	30-70	2389-2485	43,4-94,1	3,47-7,53	6,4-0,8	8-20	300-600

Применение цементных составов ЦЕМ152,5Н+(КГВН) ЦЕМ152,5Р+(КГВП) обеспечит максимальный срок эксплуатации бетонных конструкций в сложных геологических условиях региона размещения ППЗРО.

Далее рассмотрены конструктивные изменения, вызываемые переходом от принятого в строительстве специальных объектов бетона класса В30 на бетон класса В70, полученный путем использования добавки поликарбоксилата, имеющий более высокую водонепроницаемость. В исходном проекте железобетонная стена имеет толщину 800мм. Параметры бетона класса В30 ($\rho=2,389$ т/м³, $\sigma_{сж}=43,4$ МПа, W6, F300). Переход на бетон класса В70 ($\rho=2,485$ т/м³, $\sigma_{сж}=94,1$ МПа, W20, F600), дает возможность изменить конструктивные размеры - толщину несущих стен модульных сооружений. Толщина несущих стен уменьшается обратно пропорционально прочности используемого бетона на сжатие, с $\sigma_{сж}=43,4$ МПа на бетон с $\sigma_{сж}=94,1$ МПа, в 2,17 раза, или до 369мм (с учетом запаса прочности).

При переходе на бетон класса В70 толщина стен в 369 мм будет достаточной чтобы выдержать нагрузку от перекрытий и покрывающего экрана, с повышением водонепроницаемости до W20, морозостойкости до F600 и сульфатостойкости.

Толщина верхнего перекрытия, находящегося под нагрузкой – весом покрывающего многофункционального гидроизолирующего экрана, при использовании бетона класса В30 составляет 250 мм, $\sigma_{изг} = 3,5$ МПа. При переходе на бетон класса В70, $\sigma_{изг} = 7,5$ МПа толщина верхнего перекрытия может быть уменьшена в 2 раза.

Бетонное днище сооружается после укладки в траншею глиняного подстилающего экрана и бентонитовых матов (1000 мм) по дну модульных сооружений ППЗРО. Параметры бетонного днища модульного сооружения зависят от плотности и водонепроницаемости бетона. При использовании бетона класса В30 ($\rho = 2,389 \text{ т/м}^3$, W6), в проекте строительства ППЗРО толщина днища принята 1000мм.

При переходе на бетон класса В70 ($\rho = 2,485 \text{ т/м}^3$, W20) толщина днища может быть уменьшена, обратно пропорционально увеличению плотности, до величины 960 мм, с повышением водонепроницаемости до W20, морозостойкости до F600 и сульфатостойкости.

В таблице 14 приведены некоторые соотношения размеров конструктивных элементов модульных сооружений для бетонов классов от В7,5 до В70, при использовании цемента ЦЕМІ52,5Н, карьерного песка, гранитного щебня, воды, нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Таблица 14. Соотношения размеров конструктивных элементов модульных сооружений: при использовании бетонов классов от В7,5 до В70, на основе цемента ЦЕМІ52,5Н

	№ №	Класс бетона	Плотность, кг/м ³	Средняя прочность бетона, МПа	Толщина конструктивных элементов: Тп(ρ) = Тд × ρд/ρп, где: Тп(ρ) – толщина проектируемой конструкции, м; Тд – толщина действующей конструкции, м (0,8 м); ρд – плотность применяемого бетона, кг/м ³ (класс В30 ρ=2389 кг/м ³); ρп – плотность бетона рекомендуемого к применению. Тп(σ) = Тд × σд/σп, где: Тп(σ) – толщина проектируемой конструкции, м; Тд – толщина действующей конструкции, м (0,8 м); σд – плотность применяемого бетона, кг/м ³ (класс В30 σ=43,4 МПа); σп – плотность бетона рекомендуемого к применению.						
					Тд=0,25 м		Тд=0,8 м		Тд=1 м	ρд/ρ п	σд/σ п
					Тп(ρ)	Тп(σ)	Тп(ρ)	Тп(σ)	Тп(ρ)		
ЦЕМІ52,5Н+(КГВН)	1	7,5	2175	9,8	0,27	1,11	0,88	3,54	1,10	1,10	4,43
	2	10	2195	13,1	0,27	0,83	0,87	2,65	1,09	1,09	3,31
	3	12,5	2220	15,7	0,27	0,69	0,86	2,21	1,08	1,08	2,76
	4	15	2230	19,6	0,27	0,55	0,86	1,77	1,07	1,07	2,21
	5	20	2255	25,9	0,26	0,42	0,85	1,34	1,06	1,06	1,68
	6	22,5	2276	30	0,26	0,36	0,84	1,16	1,05	1,05	1,45
	7	25	2311	31,7	0,26	0,34	0,83	1,10	1,03	1,03	1,37
	8	30	2391	39,2	0,25	0,28	0,80	0,89	1,00	1,00	1,11
	9	35	2426	43,9	0,25	0,25	0,79	0,79	0,98	1,02	1,01
	10	40	2456	53,8	0,24	0,20	0,78	0,65	0,97	1,03	1,24
ЦЕМІ52,5Н+(КГВП)	1	30	2389	43,4	0,25	0,25	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00
	2	35	2394	48,8	0,25	0,22	0,80	0,71	1,00	1,00	1,12
	3	40	2444	56,8	0,24	0,19	0,78	0,61	0,98	1,02	1,31
	4	45	2455	63,4	0,24	0,17	0,78	0,55	0,97	1,03	1,46
	5	50	2465	68,5	0,24	0,16	0,78	0,51	0,97	1,03	1,58
	6	55	2465	76	0,24	0,14	0,78	0,46	0,97	1,03	1,75
	7	60	2470	84,5	0,24	0,13	0,77	0,41	0,97	1,03	1,95
	8	65	2480	89	0,24	0,12	0,77	0,39	0,96	1,04	2,05
	9	70	2485	94,1	0,24	0,12	0,77	0,37	0,96	1,04	2,17

Использование бетонов высоких классов позволяет изменять размеры конструктивных элементов модульных сооружений.

Третье положение:

- методологию выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом использования инновационных конструктивных материалов базируется на научно-методических принципах реализации проектных решений в области создания высокоэффективных барьеров безопасности на основе проектных технологических решений с использованием шпунтовых конструкций: - при этом требуемые конструктивные параметры шпунтового ограждения изолируемых модульных сооружений достигаются использованием облегченных трубошпунтов из композиционных материалов, диаметром от 200 до 800 мм, длиной до 20 м, в комбинации с технологией создания колонн струйной цементации в сочетании с композитными укрепляющими анкерами, что обеспечивает долговременную надежную защиту контейнеров с радиоактивными отходами от латеральных грунтовых вод, а вмещающей среды - от воздействия радионуклидов. Данная составляющая позволяет выявить необходимые проектные мероприятия, обеспечивающие перевод геотехнологической структуры в новое, более эффективное состояние, его стабилизацию и прогноз его жизненного цикла на краткосрочную и долгосрочную перспективу с одновременным снижением рисков, присущих вариантам развития аварийных ситуаций при различных вероятностях их реализации.

Одним из перспективных противофильтрационных барьеров, обеспечивающих долговременную изоляцию ППЗРО от влияния поверхностных и грунтовых вод является шпунт на основе трубных конструкций. В таблицах 1, 2 Приложения В диссертации приведены результаты расчётов нагрузки на элемент трубошпунта из углепластика и стеклопластика. В таблице 2 Приложения В приведены результаты расчёта нагрузки на анкерную крепь при закреплении трубошпунта к боковым породам. Дерево решений (блок-схема алгоритма) по подбору параметров трубошпунта и закрепляющего анкера приведено на рисунке 18. Работы проведены экспериментально-аналитическим методом.

Данные барьеры обладают высокими физико-механическими и антикоррозионными характеристиками, что позволяет их применять как конструкционные барьеры для противофильтрационной завесы. В соответствии с ГОСТ Р 57365-2016/EN 12063:1999 «Стены шпунтовые» герметизированный замок шпунта описывается величиной, обратной значению сопротивления просачиванию - коэффициентом фильтрации, равным 5×10^{-10} м/с.

Изготовление трубошпунтов производится путем машинной намотки стеклопластиковой или углепластиковой нити определенной толщины (линейной плотности нити) на вращающуюся цилиндрическую оправку, которые при их пропитке вязущим образуют сплошную поверхность трубы. У углепластиковой трубы увеличение толщины намотки стенки до 15 мм приводит к снижению показателя прогиба у трубы $\varnothing 200$ мм до 3,5 м, что в 1,7 раза меньше, чем у трубы аналогичного диаметра с толщиной стенки 8 мм. При увеличении диаметра от $\varnothing 200$ до 500 мм показатель прогиба трубы изменяется в 18 раз, с 3,5 м до $\sim 0,2$ м, изгибающий момент возрастает (от 60% до 143%) с 0,17 до 1,19 МН·м. У трубы с $\varnothing 600$ -800 мм показатели, так же, как и у трубы с толщиной стенки 8 мм, имеют умеренное снижение прогиба от 113 мм до 46 мм (изменение составляет от 32% до 46%), изгибающий момент возрастает с 1,74 до 3,15 МН·м.

У стеклопластиковой трубы аналогичные изменения, что и у углепластиковой, но так как модуль упругости у стеклопластика (25000 МПа) в 2,4 раза меньше, чем у углепластика (61000 МПа), показатели прогиба выше практически в три раза, изгибающий момент меньше в среднем на 25%. У трубы при толщине намотки стенки 8 мм и диаметре от $\varnothing 200$ мм до $\varnothing 500$ мм показатель прогиба изменяется в 16,8 раз с $\sim 14,6$ м до $\sim 0,9$ м, изгибающий момент увеличивается с 0,8 до 0,55 МН·м, у трубы с $\varnothing 600$ -800 мм прогиб снижается более чем в 2 раза с 0,5 м до 0,2 м, изгибающий момент симбатно увеличивается в ~ 2 раза с 0,79 до 1,42 МН·м. Увеличение толщины намотки стенки до 15 мм позволяет снизить показатель прогиба у трубы $\varnothing 200$ мм чуть больше

чем в 1,5 раза по сравнению с трубой $\varnothing 200$ и стенкой 8 мм - до 8,7 м. При увеличении диаметра от 200 до 500 мм показатель прогиба трубы изменяется с 8,7 м до $\sim 0,5$ м, изгибающий момент с 0,14 до 0,98 МН·м, у трубы $\varnothing 600$ -800 мм показатели указывают на сдержанное изменение прогиба от 276 мм до 114 мм, изгибающего момента с 1,44 до 2,60 МН·м.

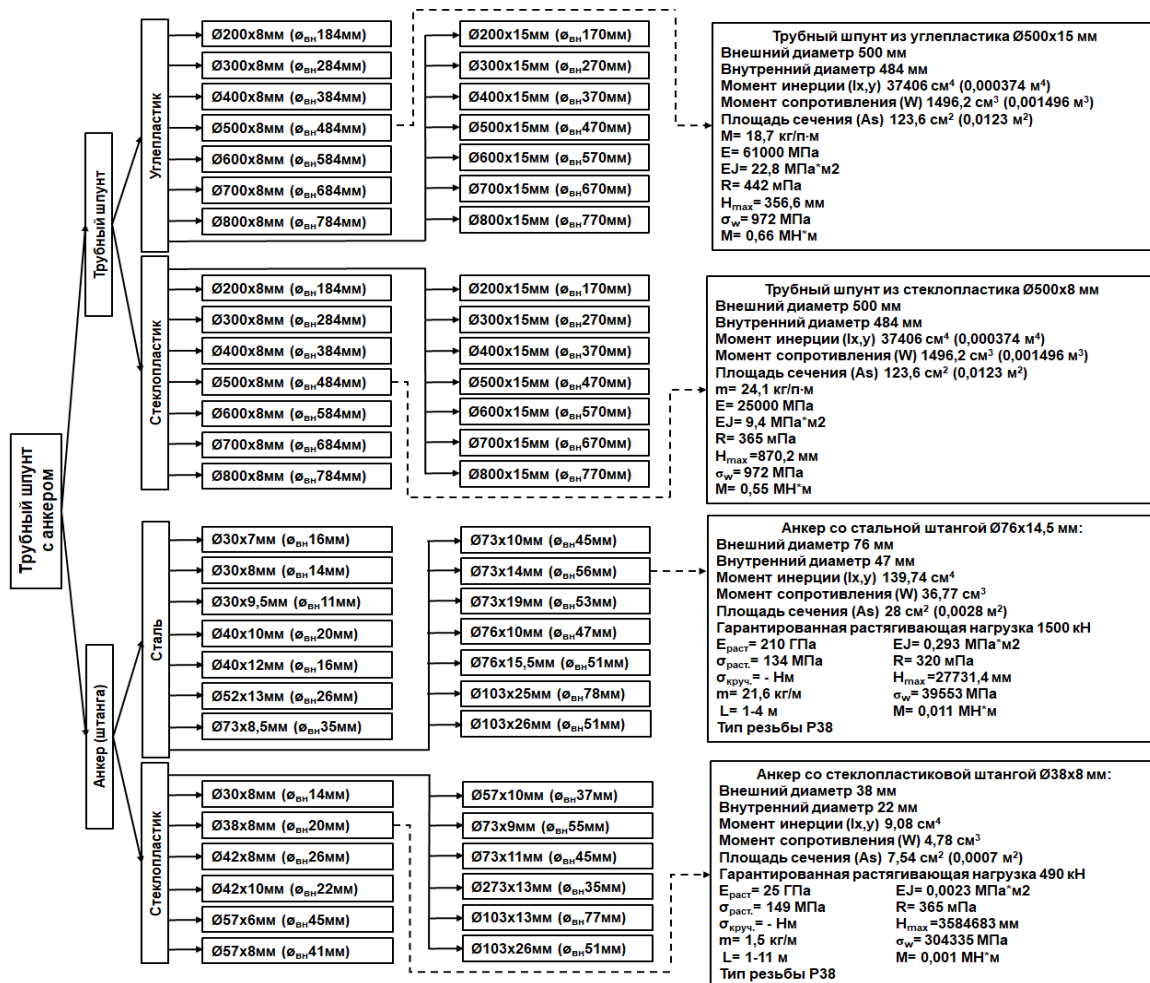


Рисунок 18 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по подбору параметров углепластикового, стеклопластикового трубошпунта и полимерного композиционного анкера.

На рисунке 19 приведен общий вид подпорной стены из трубошпунта при строительстве ППЗРО и усиливающего самозабуривающегося анкера.

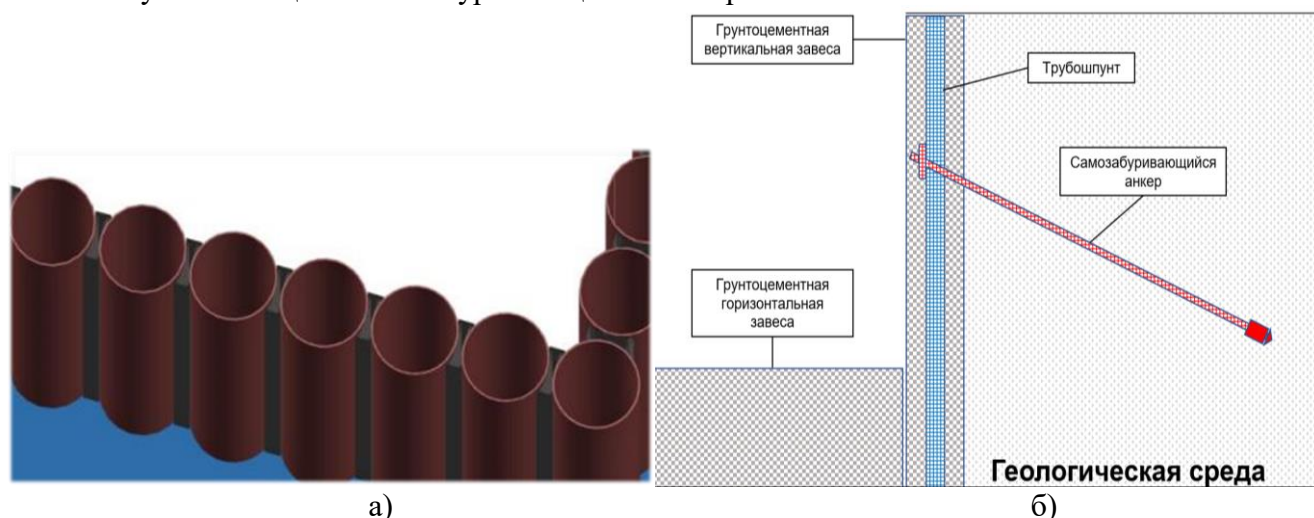


Рисунок 19 - Общий вид трубошпунтовой противофильтрационной завесы, а) принципиальная конструкция, б) стеклопластиковый самозабуривающийся анкер.

На рисунках 20 а), б) приведены расчетные зависимости (полученные из данных таблицы 2 Приложения В диссертации) диаметра трубы от показателей элемента трубчатого шпунта, а именно жесткости стенки, прогиба, изгибающего момента трубы. Динамика изменения параметров имеет идентичный механизм как у трубы из углепластика, так и трубы из стеклопластика, вне зависимости от диаметра.

У углепластиковой трубы увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм приводит к увеличению веса при толщине намотки стенки 8 мм:

у труб с $\varnothing 200-500$ мм (от 52% до 26% за каждый шаг), увеличение веса с 8,7 до 22,2 кг/п.м, рост показателя жесткости EJ с 1,4 до 22,8 МПа·м²;

у труб с $\varnothing 600-800$ мм (от 20% до 14% за каждый шаг), увеличение веса с 15,8 до 35,8 кг/п.м, рост показателя жесткости EJ с ~40 до 95 МПа·м².

Показатели расчетов сведены в таблицу 15.

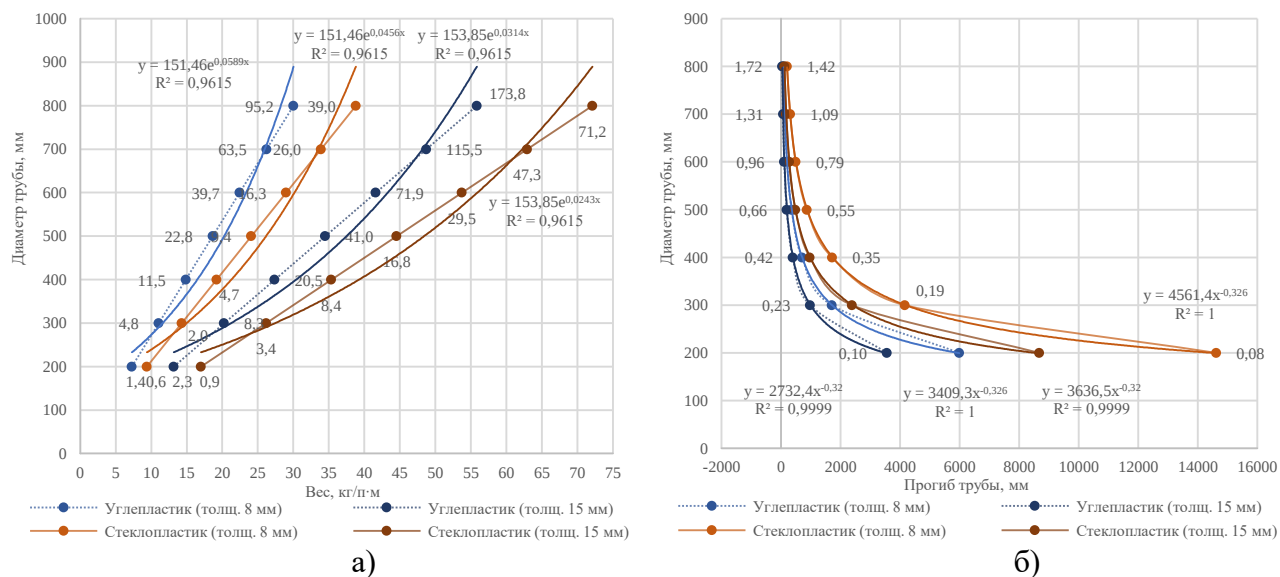


Рисунок 20 - Зависимости диаметра трубы: а) от веса трубы и жесткости её стенки, б) от прогиба трубы, изгибающего момента и момента сопротивления трубы.

Таблица 15. Показатели трубчатого шпунта.

D, мм	Толщина намотки стенки 8 мм			Толщина намотки стенки 15 мм		
	Увеличение веса		Рост показателя жесткости	Увеличение веса		Рост показателя жесткости
	%	кг/п·м		МПа м ²	%	
Углепластиковая труба, увеличение D с шагом 100мм						
200-500	52-26	8,7-22,2	1,4-22,8	54-26	24,2-41,1	2,3-41
600-800	20-14	15,8-35,8	40-95	21-15	49,6-66,6	72-174
Стеклопластиковая труба, увеличение D с шагом 100мм						
200-500	52-26	9,4-24,1	40-95	54-26	17-44,5	1-17
600-800	20-14	2,9-38,8	16-39	21-15	53,7-72,1	29,5-71

На рисунке 21, а) показано влияние площади сечения штанги анкера на нагрузку на пределе текучести и пределе прочности. Штанги из стеклопластика практически идентичны по характеристикам стальным штангам, несмотря на отличие в плотности (сталь 7,73 г/см³, стеклопластик 1,95 г/см³) и модуле упругости (сталь 210000 МПа, стеклопластик 25000 МПа).

С увеличением диаметра и жесткости трубы происходит снижение прогиба и рост изгибающего момента с увеличением момента сопротивления трубы. У углепластиковой трубы при толщине намотки стенки 8 мм с $\varnothing 200-500$ мм происходит снижение прогиба в ~18 раз с ~6 м до 0,35 м и увеличению изгибающего момента (от 60% до 135%) с 0,1 до 0,66 МН·м.

У трубы с $\varnothing 600-800$ мм динамика изменения прогиба имеет более умеренные показатели и снижается в $\sim 2,5$ раза с 0,2 м до 85 мм, это приводит к росту изгибающего момента (от 30% до 45%), с 0,96 до 1,72 МН·м.

Вертикальные ограждения из трубошпунтовой противофильтрационной завесы усиливаются стеклопластиковыми, углепластиковыми или металлическими самозабуривающими анкерами, которые устанавливаются под углом в породы, прикрепляя трубошпунтовую завесу к вмещающим породам (Рис. 19 б), (таблица 1 Приложение В диссертации).

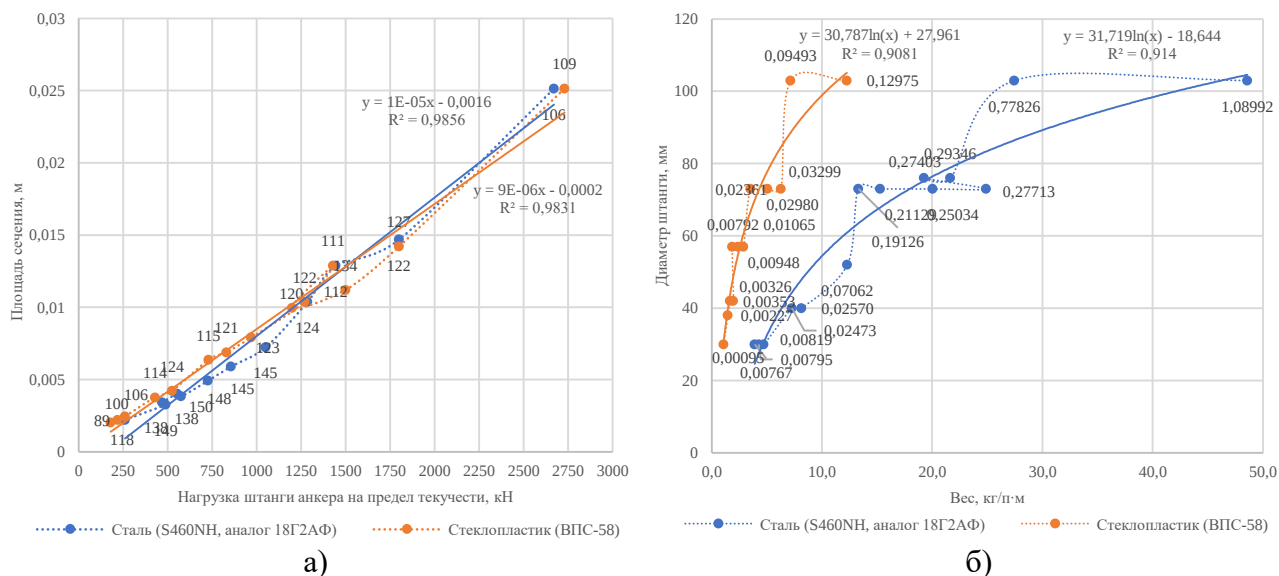


Рисунок 21 - Графики взаимосвязи: а) площади сечения и нагрузки штанги анкера, на пределе текучести, б) веса штанги анкера и ее диаметра.

Данные, представленные на рисунках 21 б), и 22 показывают влияние диаметра штанги анкера на вес, жесткость стенки штанги и изгибающий момент в момент сопротивления.

У стальной штанги увеличение диаметра с 30 мм до 103 мм приводит к увеличению веса от 3,9 кг/п·м до 48,6 кг/п·м, жесткости стенки от 0,0076 МПа·м² до 1,0899 МПа·м², изгибающего момента от 0,0008 МН·м до 0,0322 МН·м.

У стеклопластиковой штанги увеличение диаметра от 30 мм до 103 мм приводит к увеличению веса от 1,1 кг/п·м до 12,3 кг/п·м, жесткости стенки от 0,0009 МПа·м² до 0,1297 МПа·м², изгибающего момента от 0,0009 МН·м до 0,0367 МН·м.

Максимальные показатели прочности штанги на растяжение приведены в таблице 16.

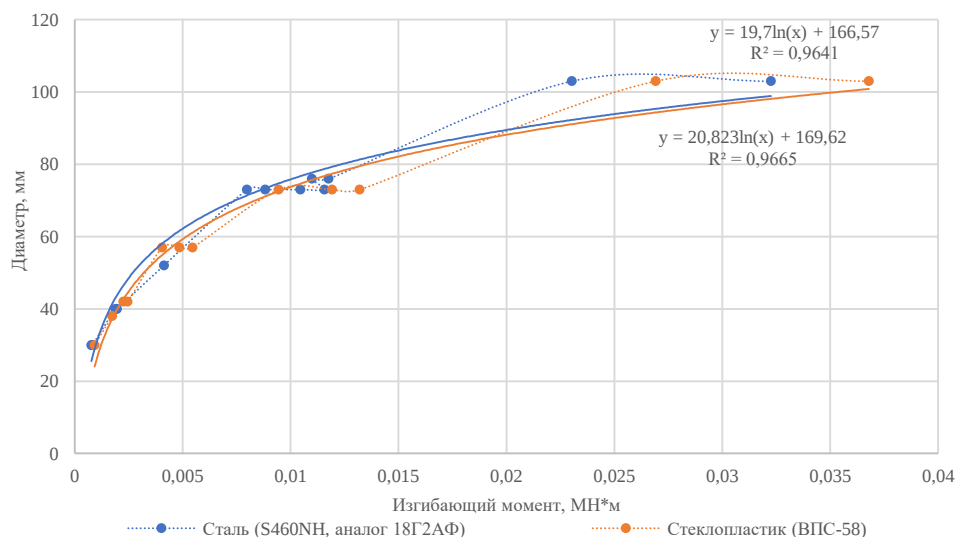


Рисунок 22 - Зависимость диаметра от изгибающего момента штанги анкера.

Технология установки трубошпунтовой завесы: вначале производится размыв грунта по струйной технологии на всю глубину шпунта - подготовка стальным кондуктором лидерной полости – грунтоцементной колонны. Предварительно в цементный раствор вносится комплексная добавка струйной цементации (КДСЦ), придающая колонне водоотталкивающие свойства (приведено в диссертации). Далее трубошпунт погружается в колонну из размываемого грунта с цементом, при отверждении повышается изгибная жесткость противофильтрационной завесы (ПФЗ), контролируется наличие протечек между трубами. Усиление завесы анкерами производится после отверждения грунтоцементной колонны, после зачистки участка колонны на определенной высоте для установки прижимной плитки анкера.

Таблица 16.

Тип штанги	Нагрузка на пределе текучести (Р _т), кН	Площадь сечения (As), м ²	Прочность на растяжение, МПа	Вес (м), кг/пм	Жесткость стенки (EJ), МПа·м ²	Изгибающий момент (M), МН·м
Стальная штанга						
40x12	525	0,001	124	8,2	0,0257	0,0019
103x12,5	1800	0,035	127	27,5	0,7782	0,0230
76x14,5	1500	0,0028	134	21,6	0,2934	0,0117
Стеклопластиковая штанга						
57x8	727	0,0012	150	2,4	0,0095	0,0048
38x8	490	0,0008	148	1,5	0,0023	0,0017
57x6	576	0,0009	149	1,9	0,0079	0,0041

Основные достоинства композиционных трубошпунтов: малый вес при большой длине (до 20м), удобство в монтажных работах по погружению в грунтоцементные колонны, малые эксплуатационные затраты, собственное изготовление с заданными свойствами, высокая степень изоляции объекта, стойкость к агрессивным средам, внешний вид лучше, чем у стального шпунта и ж/б стены в грунте.

Наличие трубошпунтовой завесы позволяет снизить воздействие грунтовых вод на стены и основание модульного сооружения.

Для конкретного объекта - пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов в диссертации произведены численное моделирование и расчёт этапов строительства подпорной конструкции из трубошпунтовой завесы.

Четвертое положение:

- адаптацию перехода к реализации проектной технологической платформы строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов целесообразно рассматривать и реализовывать с использованием разработанной процедуры, предусматривающей оптимизацию параметров проектной технологии струйной цементации, что обеспечивает получение высоких прочностных, изоляционных характеристик плиты из колонн грунтоцементной завесы под основанием модульных сооружений: - водоцементное отношение должно составлять В/Ц=0,7, диаметр колонны - 0,8м, эффективная скорость подачи цементного раствора в грунтовый массив -100л/мин, что обеспечивает срок службы горизонтального барьера до 1100 лет.

Грунтоцементная завеса возводится перед сооружением котлована модульного сооружения в донной части модульного сооружения по технологии высоконапорной струйной цементации Jet-1 на требуемой глубине, диаметр колонн 800 мм, толщина создаваемой плиты 4,5м (Рис.23).

Расчеты параметров противофильтрационной завесы выполнены расчетно-аналитическим методом в соответствии с требованиями СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования». Укрепленный грунт должен представлять собой грунтоцементную плиту в грунте, с однородными в плане и по глубине свойствами со следующими характеристиками:

- модуль деформации 100 МПа; коэффициент Пуассона не более 0,25;
- расчетное сопротивление по прочности на сжатие не менее 1,4 МПа.

Наиболее важным параметром, определяющим конечную эффективность струйной технологии, является количество цемента, содержащегося в 1 м³ укрепленного грунта. Именно данный параметр определяет прочность материала в колоннах грунтоцементных завес и их противофильтрационные свойства.

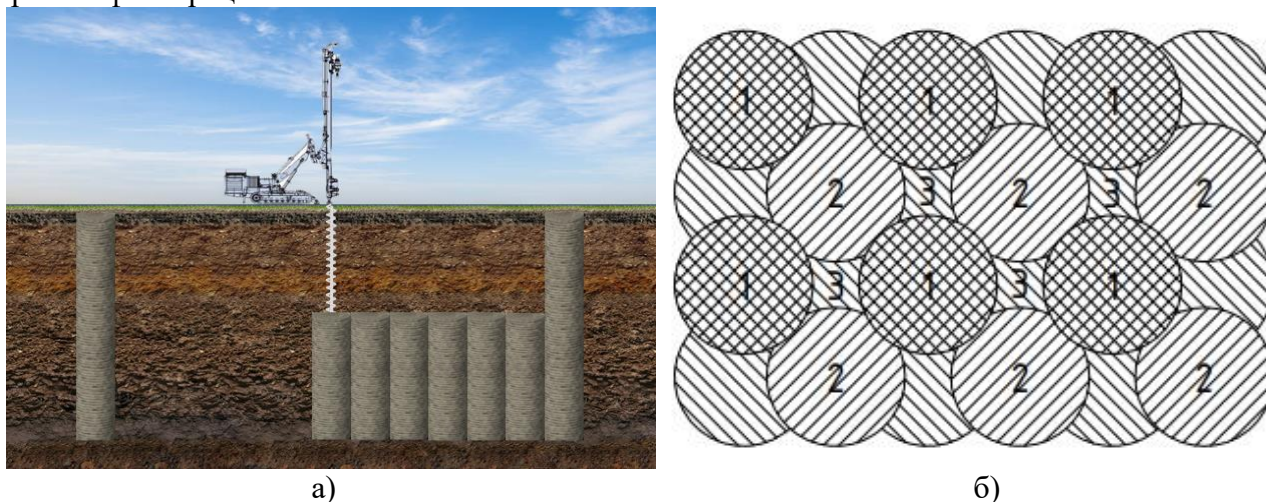


Рисунок 23 - Сооружение грунтоцементной горизонтальной завесы (плиты) методом струйной цементации, перед выемкой грунта для котлована модульного сооружения: а) общий принцип создания грунтоцементной завесы, б) последовательность выполнения этапов струйной цементации.

На рисунке 24 представлено дерево расчёта (блок-схема алгоритма) технологических параметров струйной цементации для двух инженерно-геологических элементов, ИГЭ2.1 (суглинок пролювиальный) и ИГЭ3.1 (суглинок элювиальный), характерных для ППЗРО. Для определения оптимальных технологических параметров производства грунтоцементных элементов (ЦГЭ, колонны), в диссертации произведен анализ факторов, влияющих на плотность получаемого грунтоцемента. Расчёты выполнены с учётом разного водоцементного отношения (от 0,7 до 1,0), плотности портландцемента (3,1 т/м³ и 1,6 т/м³), диаметров колонн (0,8 м, 1,0 м).

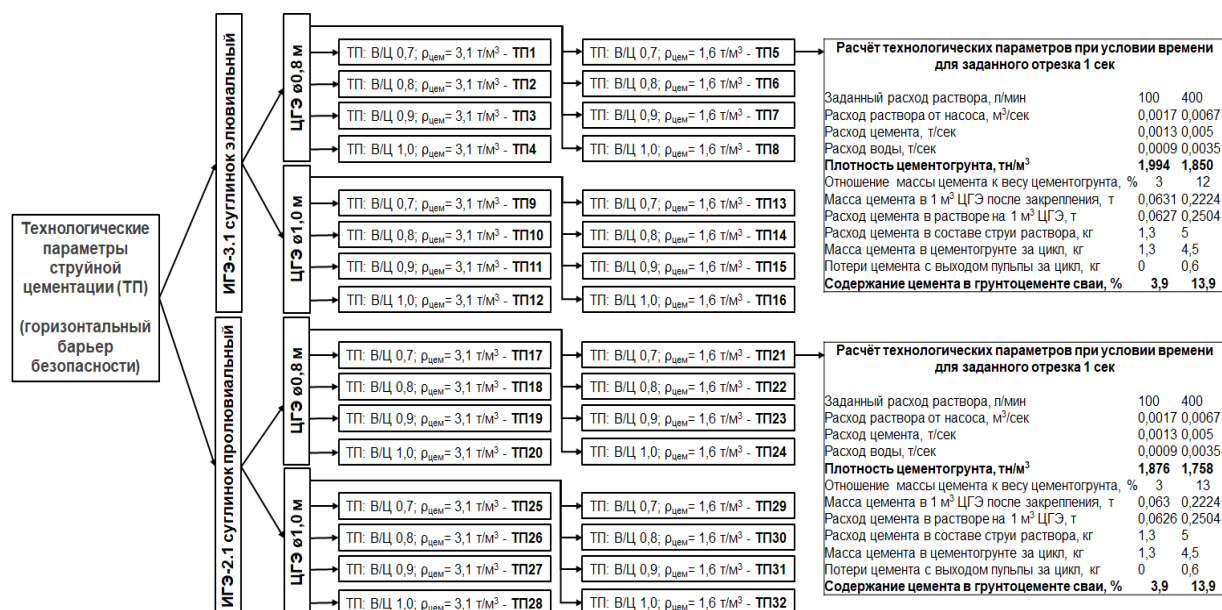


Рисунок 24 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по расчёту технологических параметров струйной цементации для двух инженерно-геологических элементов (ИГЭ), двух диаметров грунтоцементных элементов, двух видов плотности цемента и различного водоцементного отношения.

На рисунках 25 а, б приведена схожая динамика изменения плотности получаемого грунтоцемента для суглинков пролювиального (ИГЭ2.1) и элювиального (ИГЭ3.1) в зависимости от водоцементного отношения. На уровень плотности грунтоцемента влияет диаметр колонны, скорость подачи раствора из насоса высокого давления в буровой установке и, как следствие, содержание цемента в грунтоцементной колонне по окончании заполнения заданного отрезка высоты укрепляемого массива рассматриваемого ППЗРО.

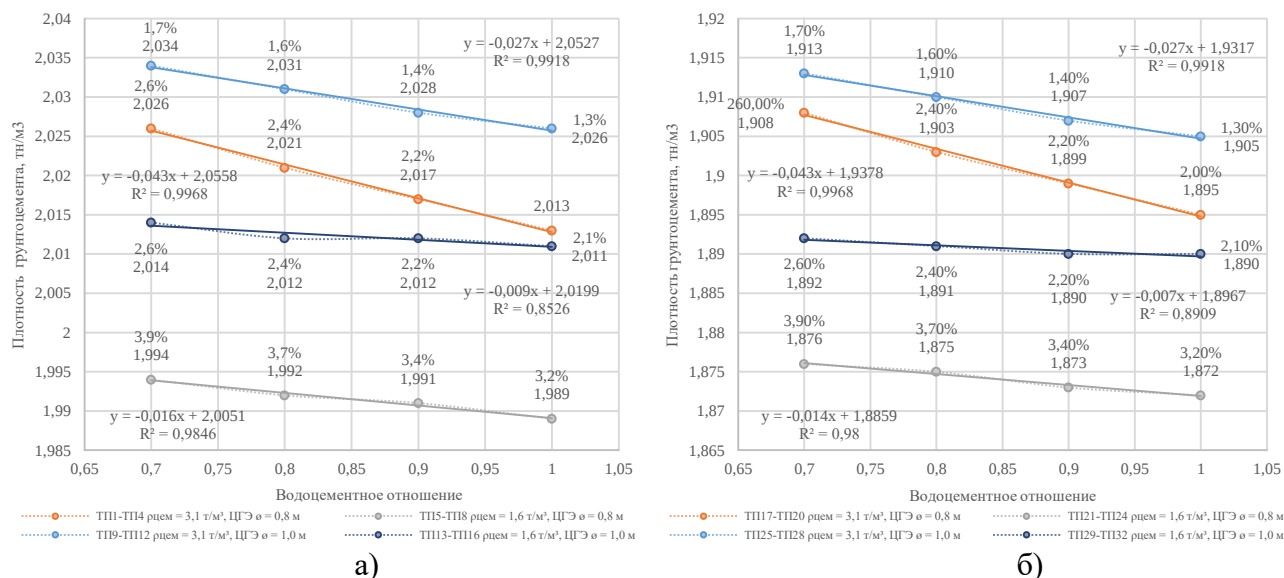


Рисунок 25 - Зависимости плотности грунтоцемента от а) водоцементного отношения (время для заданного отрезка высоты 1 сек, расход раствора 100 л/мин (1,7 л/сек)) для условий ИГЭ 2.1, б) водоцементного отношения (время для заданного отрезка высоты 1 сек, расход раствора 100 л/мин (1,7 л/сек)) для условий ИГЭ 3.1. (Обозначения – см. Рис.24).

Как видно из рисунков 25, а), б) при увеличении диаметра колонны с 0,8 м до 1 м происходит увеличение плотности грунтоцемента в условиях заполнения заданного отрезка высоты укрепляемого массива колонны.

У ИГЭ2.1 (суглинков пролювиальный) увеличение плотности составляет 0,4-0,65% (при В/Ц=0,7-1,0, ρ_ц = 3,1 т/м³), 1-1,1% (при В/Ц= 0,7-1,0, ρ_ц = 1,6 т/м³).

Однако, если проанализировать показатели содержания цемента в грунтоцементе производимой колонны, то показатель - увеличение плотности можно считать не эффективным, так как параллельно увеличению плотности происходит понижение содержания цемента в грунтоцементной колонне в среднем в полтора раза в обоих ИГЭ с 2,0-2,6% до 1,3-1,7% (при В/Ц =0,7-1,0, ρ_ц = 3,1 т/м³), с 3,2-3,9% до 2,1-2,6% (при В/Ц =0,7-1,0, ρ_ц = 1,6 т/м³).

Изменение плотности цемента в расчётах с ρ_ц = 3,1 т/м³ (истинная плотность портландцемента) на ρ_ц = 1,6 т/м³ (насыпная плотность портландцемента) приводит к понижению показателя плотности грунтоцементной колонны при Ø0,8м на 1,2-1,6%, при Ø1,0м на 0,8-1,1% и увеличению содержания цемента в колонне в полтора раза в ИГЭ2.1 и ИГЭ3.1.

Влияние водоцементного отношения в растворе при производстве работ также является одним из ключевых факторов, влияющих на показатель плотности колонны, и, как следствие, на содержание цемента в ней.

В ИГЭ2.1 и 3.1 с понижением отношения В/Ц происходит небольшое увеличение плотности грунтоцемента. У колонны диаметром Ø0,8 м, плотностью ρ_ц = 3,1 т/м³ плотность грунтоцемента изменяется на величину от 0,2% (В/Ц =1,0) до 0,7% (В/Ц =0,7), при ρ_ц = 1,6 т/м³ плотность изменяется от 0,05% (В/Ц= 1,0) до 0,2% (В/Ц= 0,7).

У колонны диаметром Ø1 м плотностью ρ_ц = 3,1 т/м³ плотность грунтоцемента изменяется от 0,1% (В/Ц =1,0) до 0,4% (В/Ц =0,7), при ρ_ц = 1,6 т/м³ изменение плотности от 0,05% (В/Ц=1,0) до 0,1% (В/Ц=0,7). Содержание цемента в грунтоцементе колонны

увеличивается в 1,2-1,3 раза, у колонны диаметрами $\varnothing 0,8$ м и $\varnothing 1$ м, с $\rho_{\text{цем}} = 3,1$ т/м³, $\rho_{\text{зем}} = 1,6$ т/м³ в обоих ИГЭ.

Повышение прочности грунтоцемента происходит в результате физико-химических реакций между глинистым грунтом и вяжущим, т.е. в результате взаимодействия веществ, присутствующих в глинах и продуктах гидратации портландцемента. Более высокая плотность и прочность достигается за счет уменьшения пустот, связывания грунтовых частиц и их агрегации, сохранения флокуляционной структуры и предотвращения набухания грунта. Это позволяет корректировать толщину бетона в основании модульного сооружения, снизив до 960мм.

В условиях влияния сульфатов грунтовых вод, при толщине грунтобетонной завесы в основании котлована для модульного сооружения ППЗРО, равной 4,5м, в диссертации рассчитано время полного выщелачивания завесы - до 1100 лет, что является доказательством пятого положения.

Анализ влияния трубошпунтовой и грунтоцементной завес на долговременную изоляцию РАО в модульных сооружениях ППЗРО выполнен методом компьютерного моделирования, с использованием программных комплексов, разработанных С.В. Святцовом, А.А. Куваевым, Н.А. Анисимовым, (ФГБУ «Гидроспецгеология»), путем расчета миграции из ППЗРО малосорбируемого долгоживущего радионуклида йод-129, с заданием условия, что бетонные конструкции модульного сооружения по прошествии 300 лет находятся в разрушенном состоянии, а свойства трубошпунтовой и грунтоцементной завес остаются первоначальными, без изменений. Дно хранилища находится выше уровня грунтовых вод (УГВ). Расчеты выполнены для 4 вариантов сочетания барьеров безопасности:

А – отсутствие трубошпунта и грунтоцементной завесы (рис. 26, а);

Б – наличие трубошпунта и грунтоцементной завесы (рис. 26, б);

В – наличие трубошпунта и отсутствие грунтоцементной завесы (рис. 26, в);

Г – отсутствие трубошпунта и наличие грунтоцементной завесы (рис. 26, г).

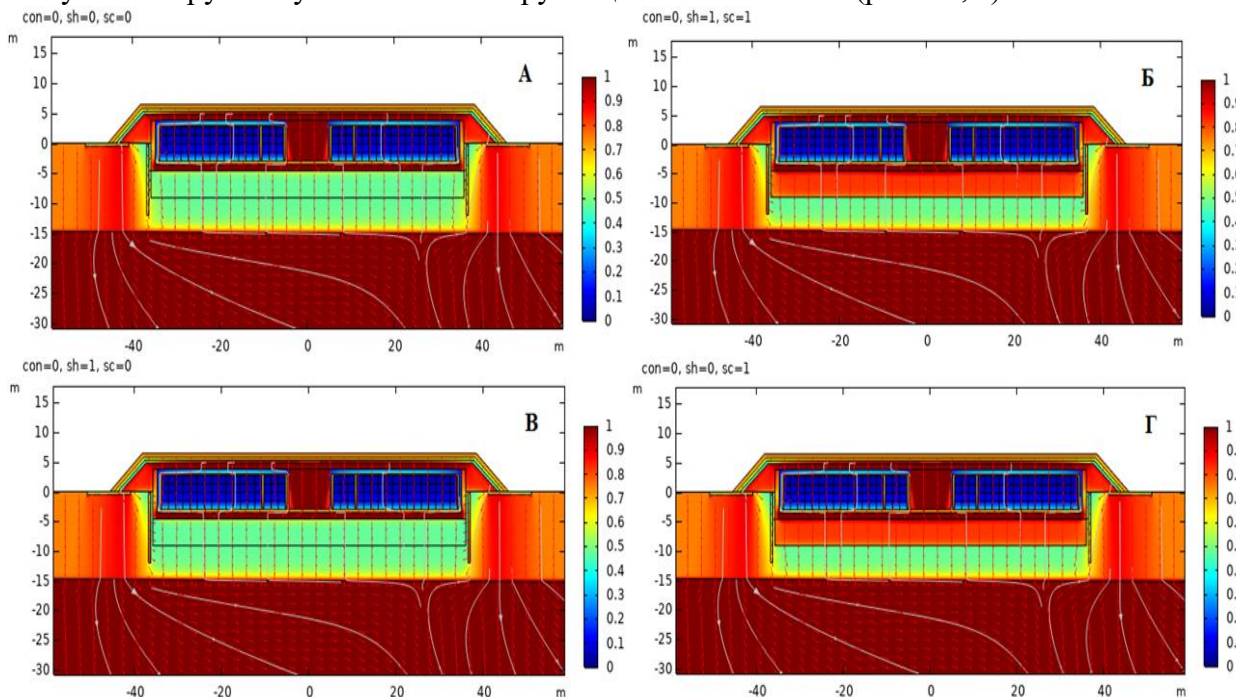


Рисунок 26 - Результаты расчётов относительной влажности и векторов скоростей поверхностных и грунтовых вод.

На рисунке 26 приведены результаты расчетов относительной влажности и векторов скоростей воды, фильтрующейся в конструкциях ППЗРО и в геологической среде.

Видна неизменность векторов движения осадков и грунтовых вод, во всех четырёх вариантах условий, меняется только сочетание взаимодействий. На рисунке 26, а) показано взаимодействие глиняного замка модульного сооружения с осадками и латеральным потоком

УГВ, на рисунке 26, б) показана комплексная работа горизонтального и вертикального барьеров, работающих как экран, по которому осадки и грунтовые воды огибают модульное сооружение ППЗРО, небольшой зазор между горизонтальными и вертикальными барьерами исключает возможность эффекта ванны и в случае разрушения верхнего покрывающего экрана не произойдёт сбора осадков и образования искусственного водоёма. На рисунках 26, в) и г) показана независимая работа горизонтального и вертикального барьеров.

Результаты моделирования фильтрации долгоживущего несорбируемого радионуклида йод-129 приведены на рисунке 27 в виде графиков поступления радионуклидов на уровень грунтовых вод (УГВ) в промежутке времени от 0 до 15 тыс. лет.

Используются следующие обозначения:

- sh, sc: соответственно трубошпунт, экран струйной цементации;
- 0, 1: соответственно отсутствие или наличие указанного элемента в конструкции ППЗРО.

По результатам моделирования фильтрации радиоизотопа йода I-129 построены графики поступления радионуклида на уровень грунтовых вод (УГВ) в период времени от 0 до 15 тыс. лет (рисунок 27).

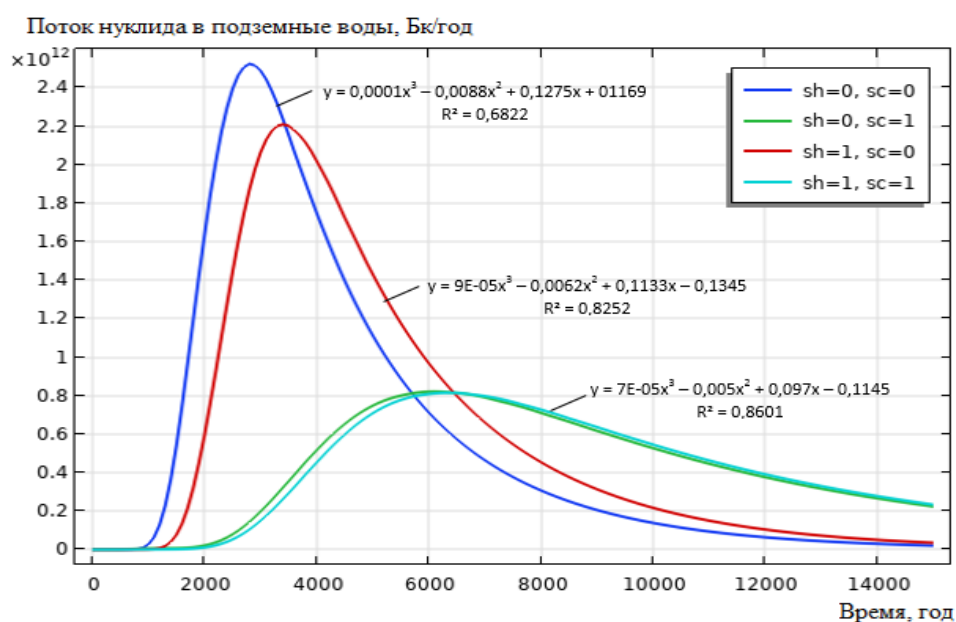


Рисунок 27. Зависимости потока радионуклидов йода-129 в промежутке времени 0 – 15 тыс. лет для 4 вариантов работы барьеров безопасности - трубошпунтовой и грунтоцементной завес.

Из графиков Рис. 27 следует, что в принятой конструкции модульного сооружения ППЗРО:

- при отсутствии трубошпунтовой и грунтоцементной завес поток радионуклидов на уровень грунтовых вод (УГВ) активный, достигает $2,5 \times 10^{12}$ Бк/год, происходит фильтрация радионуклидов через природные суглинки, темп роста и снижения потоков нуклидов высокие;
- при отсутствии трубошпунтовой завесы и наличии горизонтальной грунтоцементной завесы поток нуклидов снижен до $0,8 \times 10^{12}$ Бк/год (в 3 раза), благодаря эффекту сорбирования нуклидов грунтоцементом;
- при наличии трубошпунтовой завесы и отсутствии грунтоцементной завесы наблюдается сорбирование нуклидов данным барьером, поток нуклидов на УГВ снижен до $2,2 \times 10^{12}$ Бк/год, т.е. на 14% от максимального, влияние трубошпунта менее значительное в силу его вертикального расположения;
- при наличии трубошпунтовой и грунтоцементной завес наблюдается сорбирование нуклидов, поток нуклидов на УГВ снижен до $0,8 \times 10^{12}$ Бк/год (в 3 раза), график совпадает с

графиком наличия грунтоцементной завесы, следовательно, эффект сорбирования нуклидов горизонтальной грунтоцементной завесой является преобладающим;

- достижение максимума активности выхода нуклидов на уровень УГВ при наличии трубошпунтовой и грунтоцементной завес происходит позже, со сдвигом «вправо» на 3 тыс. лет, в сравнении с фильтрацией нуклидов в грунтах; выход нуклидов на УГВ при наличии завес более растянут во времени, с меньшей активностью;

- при отсутствии завес и при наличии трубошпунтовой завесы через 15 тысяч лет поток радионуклидов из модульного сооружения на УГВ прекращается, а при наличии трубошпунтовой и грунтоцементной завес еще находится на уровне $0,2 \times 10^{12}$ Бк/год. Процесс выхода нуклидов на УГВ при наличии завес более растянут во времени, происходит с меньшей активностью.

Полученные результаты подтверждают изолирующие способности, эффективность трубошпунтовой и грунтоцементной завес.

Пятое положение направлено на исследование и выявление сценариев аварийных ситуаций с наиболее опасными сочетаниями событий по выходу барьеров безопасности из строя:

- *конечным элементом методологии выбора и комплексного обоснования проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов является переход ее составляющих из области обоснования проектных производственных процедур и правил в область управления ими за счет формирования оценочной процедуры риска реализации подобных проектов, ее содержательного наполнения, методов и инструментов, позволяющих сопоставлять опасные сочетания реализации аварийных событий по выходу барьеров безопасности из строя, приводящие к раннему проникновению радионуклидов в грунты с привлечением метода комбинаторики и моделированием сценариев аварийных ситуаций, что дает возможность их прогнозировать и своевременно предотвращать.*

Сценарии работы системы инженерных барьеров безопасности (ИББ) выполнены методом компьютерного моделирования, рассматриваются в различных сочетаниях ИББ. Сценарий нормального эволюционного процесса деградации: в контейнерах не имеется материалов, содержащих влагу, биологических веществ, бактерий; бетонные сооружения стен не смачиваются влагой – т.е. нет процессов, потенциально разрушающих инженерные барьеры безопасности изнутри. Вступление инженерных барьеров «в работу» происходит только от внешних воздействий, в следующей последовательности (Рис.28).

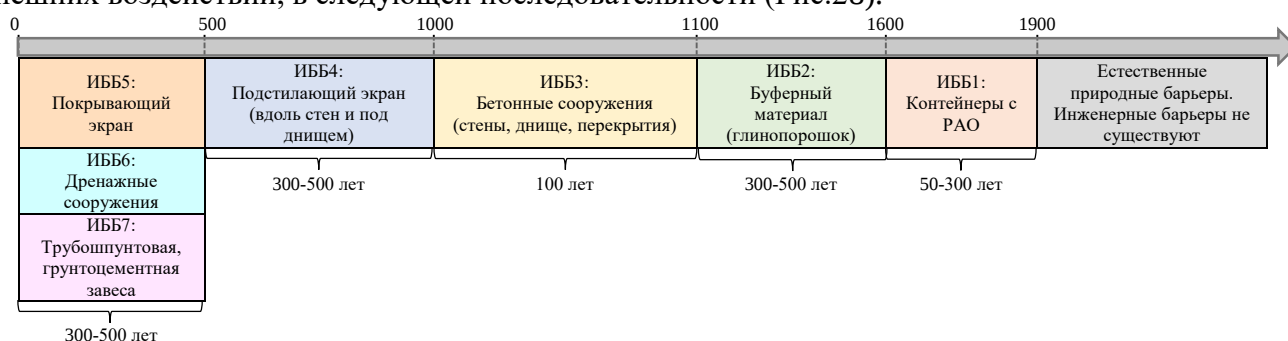


Рисунок 28 - Диаграмма последовательного «вступления в работу» инженерных барьеров безопасности во времени, (сценарий нормального эволюционного процесса деградации - разрушение барьеров от воздействий поверхностных и грунтовых вод).

Сценарий последовательного выхода из строя ИББ, без учета влияния разрушения предыдущих на последующие ИББ и внутренних процессов в ИББ. Для рассмотрения приняты консервативные сроки долговременной изоляции ИББ. При внешнем воздействии (инфильтрация поверхностных, грунтовых вод) первыми «в работу» вступают покрывающий экран (ИББ 5), дренажные сооружения (ИББ 6) и грунтоцементная завеса (ИББ 7). После их разрушения (300-500 лет) воды воздействуют на подстилающий глиняный экран вдоль стен и под днищем МС

(ИББ 4). После его разрушения (300-500 лет) воды воздействуют на бетонные сооружения – стены, днище, перекрытие кровли (ИББ 3), изготовленные из бетонов общегражданского строительства (консервативный вариант).

После их разрушения (через 100 лет) воды воздействуют на сыпучий буферный материал в пространстве между стенками МС и контейнерами, в зазорах между контейнерами (ИББ 2). Процессы разрушения контейнеров (ИББ 1) вследствие размещенных в них РАО могут происходить вследствие внутренних процессов в период до 300 лет после размещения их на захоронение, но перенос радионуклидов из разрушающихся контейнеров возможен только после диффузии к ним воды от ИББ 2.

В диаграмме (Рис.28) обозначены последовательно сроки «вступления в работу» ИББ. В данном «упрощенном» сценарии срок эффективной эксплуатации инженерных барьеров ППЗРО по изоляции РАО составляет 1050 – 1900 лет. Однако, разрушение ИББ 5 в первые 300-500 лет (при интенсивных климатических осадках) может вызвать приток инфильтрационных вод к бетонным сооружениям ИББ 3, которые начнут разрушаться на 300-500 лет раньше.

Это вызывает сдвиг начала разрушения всех последующих ИББ, раннее разрушение всего ППЗРО. Бетонные сооружения ИББ 3 (бетон гражданского строительства) выйдут из строя раньше (через 100 лет), чем защищающий их от грунтовых вод подстилающий экран ИББ 4 (через 300-500 лет). Комбинаций может быть несколько. Ниже рассмотрены сценарии – все сочетания совместной «работы» различных ИББ и выделение из них реальных.

При моделировании рассматриваются последовательно сценарии выхода из строя от внешнего воздействия одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО (по диаграмме Рис.28) и влияние этого события на состояние других ИББ (Таблица 17). В комбинаторике – это число формальных сочетаний из 7 элементов по 2, всего 21; в таблицу 17 вносятся комментарии только реальных сочетаний (12), соответствующих диаграмме, + ожидаемый результат.

Таблица 17. Сценарии выхода из строя одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ.

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ7	ИББ6	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1
ИББ7	-----	Увеличение объёма подземных вод. Риски ускоренного заиления	-----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	-----	-----	-----
ИББ6	Увеличение инфильтрации	-----	-----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	-----	-----	-----
ИББ5	-----	Уменьшение объёма воды	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	-----
ИББ4	-----	-----	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	-----
ИББ3	-----	-----	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	-----	Ускоренная деградация	-----
ИББ2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Ускоренная деградация
ИББ1	-----	-----	-----	-----	-----	Влияние продуктов коррозии (н/р, ЖЗК)	-----

Приводится только прямое внешнее влияние, последующая цепочка влияний на другие ИББ и внутренние процессы в ИББ не рассматриваются, хотя имеют место. По вертикали – вышедшие из строя ИББ, по горизонтали – ИББ, на которые это событие оказало влияние, результат.

В соответствии с таблицей 17, при выходе из строя сразу после закрытия ППЗРО:

- цементо-грунтовой завесы (ИББ 7): увеличится приток подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание. Подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;
- дренажных сооружений (ИББ 6): увеличится инфильтрация вод в цементо-грунтовую завесу, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;
- покрывающего экрана (ИББ 5): приток инфильтрационных вод в дренажную систему уменьшится, бетонные сооружения стен, днища и покрытий получают воды инфильтрации, находятся в ускоренной деградации и разрушения;
- подстилающего экрана из глины (ИББ 4): получают раннее смачивание водой и деградацию все бетонные сооружения;
- бетонных сооружений стен, днища и перекрытий (ИББ 3): теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен, наступает деградация буферного материала;
- буферного материала (ИББ 2): наступает ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО.

Далее последовательно рассматриваются сценарии одновременного выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, и какое влияние это событие оказывает на остальные ИББ. После этого – одновременный выход из строя трех ИББ.

Опасными сценариями, при которых в ранние сроки разрушается наибольшее число ИББ, являются ИББ 3 и ИББ 5 – выход из строя бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли) и покрывающего экрана. Для увеличения сроков долговременной безопасности объектов финальной изоляции РАО необходимо увеличивать сроки эксплуатации ИББ 3 и ИББ 5 с помощью разработанных составов бетонов. При консервативном сценарии трубошпунтовая и грунтоцементная завеса обеспечивают дополнительно долгосрочную изоляцию РАО более 300 лет.

Наиболее консервативный сценарий – «в работу» вступают все ИББ сразу после заполнения модульного сооружения контейнерами с РАО (закрытия ППЗРО) (Рис.29).

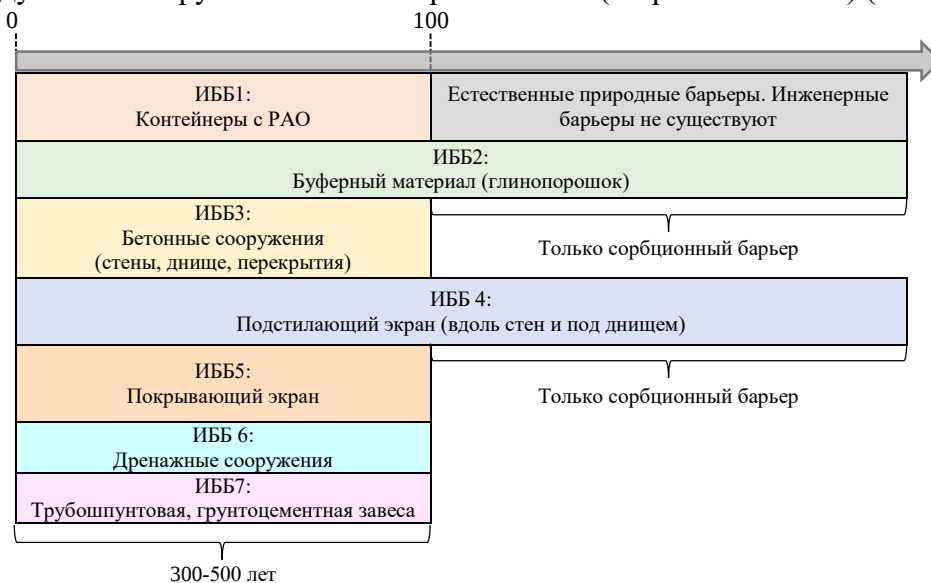


Рисунок 29 - Диаграмма одновременного «вступления в работу» инженерных барьеров безопасности во времени. Наиболее консервативный сценарий.

В данном сценарии инженерные барьеры, состоящие из цемента, бетона, металлических конструкций, смогли эффективно противостоять разрушению лишь 100 лет. В наиболее ранний срок – через 100 лет разрушается ИББ 3 – бетонные сооружения (консервативно: стены, днище, перекрытия). Они являются опорой для ИББ 5 – покрывающего экрана, который может начать разрушаться ранее проектного срока, потеряв опору.

Наибольшей устойчивостью к воздействию грунтовых вод обладают инженерные барьеры ИББ 4 и ИББ 2, обеспечивающие изоляцию модульных сооружений ППЗРО за счет противодиффузионных и противомиграционных свойств материала – глины. Благодаря им в данном сценарии срок эффективной изоляции контейнеров с РАО составляет 300-500 лет.

В практике проектирования принято считать консервативным сценарием ситуацию, когда все барьеры безопасности вышли из строя одновременно сразу после закрытия ППЗРО. Исходя из Рис.29 видно, что даже при консервативном сценарии бетонные сооружения и цементно-грунтовая завеса обеспечивают долгосрочную изоляцию РАО минимум на 100 лет, барьеры на основе природных глин способны обеспечить изоляцию модульных сооружений ППЗРО на срок до 500 лет.

В результате выполнения множества расчетов выявлены опасные прогнозные сценарии выхода из строя инженерных барьеров безопасности. К наиболее опасным сценариям, при которых в ранние сроки разрушается наибольшее число ИББ относятся ИББ 3 и ИББ 5 – выход из строя бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли) и покрывающего экрана. Для увеличения сроков долговременной безопасности модульных сооружений ППЗРО необходимо увеличивать сроки эксплуатации ИББ 3 и ИББ 5 с помощью разработанных составов бетонов высокой плотности и прочности.

Это является доказательством пятого положения.

Данные результаты необходимо учитывать при долгосрочном прогнозе, расчете влияния уровней активности радионуклидов, вышедших из ППЗРО во внешнюю среду.

Проектирование и строительство сложных систем - пунктов захоронения радиоактивных отходов, отличающихся особыми требованиями долговременной изоляции РАО на геологически значимый период времени в сотни и тысячи лет, относится к общегосударственным затратным мероприятиям, финансируется из федерального бюджета. Техничко-экономическая оценка принятых проектных геотехнологических решений, определение экономической эффективности в данном случае, без представления альтернативных вариантов проектов и исследований, не производится.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании аналитических, экспериментальных исследований и опытно-промышленных испытаний автором решена крупная научно-техническая проблема, заключающаяся в совершенствовании, трансформации и развитии методологии комплексного обоснования и выбора проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом инновационной составляющей и сопутствующих рисков, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие теории проектирования горнотехнических систем с функциональным назначением обращения с радиоактивными отходами.

Основные выводы работы, отражающие научную и практическую значимость, заключаются в следующем:

1. В результате проведенного анализа и обобщения мирового опыта совершенствовании, трансформации и развитии методологии комплексного обоснования и выбора проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов с учетом сложившихся концептуальных и внутриотраслевых аспектов соответствующих тенденций и закономерностей установлено, что повышение надежности принимаемых проектных решений в заявленной области проблематики может быть обеспечено только при условии совершенствования технологии и технических средств их строительства с учетом использования инновационных конструктивных материалов и высокоэффективных барьеров безопасности, обеспечивающих устойчивые временные изолирующие параметры в условиях воздействия агрессивной геотехнологической среды. Возникла необходимость срочного принятия решений системного характера по адаптации цементной отрасли к новым и быстро меняющимся условиям функционирования.

2. Установлено, что совершенствование, трансформация и развитие методологии комплексного обоснования и выбора проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов напрямую связано с увеличением проектного срока долговременной безопасности железобетонных конструкций контейнеров, стен, оснований и перекрытий, являющихся основными изолирующими элементами модульных сооружений объектов финальной изоляции радиоактивных отходов. В этой связи необходимо перейти на использование более прочных бетонов, отличающихся измененным соотношением компонентов и применением суперпластифицирующих добавок - нафталинсульфанатов (1) и поликарбоксилатов (2), улучшающих адсорбцию частиц цемента на границе фаз цемент-вода, диспергирование частиц цемента, что повышает показатели прочности с получением полной номенклатуры марок бетона классов от В7,5 до В70 и приводит к увеличению долговременной безопасности заявленных модульных сооружений на срок более 300 лет.

3. Разработаны концептуальные основы, научно-методические и системотехнические принципы методологии комплексного обоснования и выбора проектных решений технологии строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, основанные на инновационной трансформации проектных решений на базе использования новых конструктивных материалов с применением нафталинсульфанатной (1) и поликарбоксилатной (2) добавок, что позволяет увеличить долю сырьевых компонентов в составе бетона, благодаря чему увеличивается нормативная плотность, активизируется процесс водоредукции в стабилизации изолирующей коллоидной системы проектного бетона; увеличение плотности бетона происходит пропорционально увеличению их дозировки: при добавке (1) в объеме 1,1%-1,3% (в % от цемента) плотность бетона равна 2456 кг/м³, В/Ц снижается с 1,0 до 0,45, водопоглощение – с 14,8 до 3,44%; при добавке (2) в объеме 0,4%-0,5% плотность бетона достигает 2485 кг/м³, В/Ц снижается с 0,49 до 0,33; водопоглощение - с 6,5 до 0,97%. Использование добавок (1,2) приводит к симбатному, прямо пропорциональному увеличению параметров изоляции: водонепроницаемости, морозостойкости и сульфатостойкости проектируемого бетона: применение добавки (1) в объеме от 1,1% до 1,4% позволяет получить бетон классов В7,5 - В40 с показателями морозостойкости от F50 до F300, водонепроницаемости от W0 до W12; применение добавки (2) в объеме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет получить бетон классов В30-В70 с показателями морозостойкости от F300 до F600, водонепроницаемости от W8 до W20. В конечном итоге, все это позволяет сформировать соответствующие адаптационные способности проектных решений к изменениям внутренней и внешней сред функционирования.

4. Показано, что методологическую основу научно-методического обеспечения формирования проектной технологической платформы строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов должна составлять интеграция методов многопараметрического моделирования, многокритериальной оценки, теории принятия сложных решений, методов комбинаторики, физического, математического, геофильтрационного и геомиграционного моделирования предусматривающих наиболее полный учет характерных особенностей неопределенности и рисков строительства подобных сооружений, сформировавшихся в настоящее время в сфере захоронения радиоактивных отходов. С их использованием установлено, что максимальный проектный срок полного коррозионного разрушения в сульфатных средах (раствор Na₂SO₄ с концентрацией ионов SO₄²⁻, 500мг/л) бетона на основе цемента ЦЕМІ52,5Н+(КГВН) – (песок карьерный, щебень гранитный, вода, с добавкой (1)) составляет 628 лет, бетона на основе ЦЕМІ52,5Н+(КГВП) – (песок карьерный, щебень гранитный, вода, с добавкой (2)) составляет 1013 лет. Применение крупнозернистого гранитного наполнителя с добавкой (2) позволяет увеличить нормативную прочность на сжатие бетона на 100-120% на 28 суток относительно аналогичных составов с добавлением крупнозернистого известнякового наполнителя; применение ЦЕМІ52,5Н+(КГВН), ЦЕМІ52,5Н+(КГВП) обеспечивает максимальный срок проектной эксплуатации бетонных конструкций в сложных геологических и климатических условиях региона размещения пунктов захоронения.

5. В результате проведения исследований выявлено, что разработанные проектные решения в целях повышения уровня промышленно-экологической безопасности должны предусматривать переход от бетона класса В30 ($\rho=2,389 \text{ т/м}^3$, $\sigma_{сж}=43,4 \text{ МПа}$, W6, F300) на класс В70 ($\rho=2,485 \text{ т/м}^3$, $\sigma_{сж}=94,1 \text{ МПа}$, W20, F600), полученный путем применения суперпластификаторов, который позволяет эффективно изменять конструктивные параметры горнотехнических систем (толщина несущих стен уменьшается обратно пропорционально прочности бетона на сжатие, т.е. в 2,17 раза). При исходной толщине стен 800 мм и переходе на бетон В70 для поддержания веса перекрытия и покрывающего экрана достаточна толщина стен в 369 мм, с повышением водонепроницаемости до W20, морозостойкости до F600 и сульфатостойкости. Параметры бетонного днища модульного сооружения зависят от плотности и водонепроницаемости бетона; при использовании бетона класса В30, ($\rho=2,39 \text{ т/м}^3$, W6), толщина днища в проекте 1000 мм. При переходе на использование бетона класса В70 ($\rho=2,48 \text{ т/м}^3$, W20) толщина днища может быть уменьшена, обратно пропорционально увеличению плотности, до 960 мм, с повышением водонепроницаемости до W20, морозостойкости до F600 и сульфатостойкости.

6. В рамках проектных решений обеспечения долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, проектируемых в стадии финальной изоляции, повышения защиты от грунтовых вод обоснованы конструктивные параметры предлагаемых шпунтовых завес на основе трубных конструкций, обладающих высокими физико-механическими и противодиффузионными характеристиками. С использованием численного моделирования установлено, что технологические свойства трубошпунтов находятся в степенной зависимости от материала шпунта, поперечной силы, деформативности, изгибающего момента, глубины погружения; это позволяет выбрать эффективные параметры трубошпунтовой завесы и усиливающего анкера, обеспечить надежную противодиффузионную защиту, дополнительную изоляцию модульных сооружений от латеральных грунтовых вод, а вмещающей среды - от воздействия радионуклидов. С учетом этого обоснованы рациональные конструктивные параметры грунтоцементной плиты в основании модульного сооружения ППЗРО с использованием струйной цементации, для проектирования надежной изоляции РАО от проникновения подземных вод, выхода радионуклидов в грунты, долговременной безопасности модульных сооружений и контейнеров РАО. Формирование высоких прочностных, противодиффузионных свойств и характеристик струйной цементации достигается за счет оптимизации водоцементного отношения В/Ц=0,7, оптимального диаметра колонн = 0,8 м, подбора эффективной скорости подачи раствора в грунтовый массив (100 л/мин), что замедляет выход долгоживущих малосорбируемых радионуклидов из модульного сооружения ППЗРО в подстилающие породы на 1,1 тысячи лет.

7. В рамках завершающих составляющих научно-методического обеспечения формирования проектной технологической платформы строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов разработана система и алгоритмическое обеспечение мониторинга и прогнозирования уровня ионизирующего излучения и уровня активности долгоживущих малосорбируемых радиоактивных отходов с учетом предлагаемых проектных решений. На основе прогнозных геофильтрационной и геомиграционной моделей распространения радионуклидов в грунтах при выходе из ППЗРО получены зависимости для оценки снижения в точках мониторинга при использовании изолирующих трубошпунтовой и грунтоцементной завес: - на основе этих зависимостей установлено, что максимальные уровни ионизирующего излучения и активности радиоактивных веществ снижаются до 3 раз и сдвинуты на более позднее время - «вправо» на 3 тысячи лет.

8. В целях минимизации негативных последствий проявления аварийных ситуаций и их предотвращения разработан метод и методика возникновения сценариев аварийных ситуаций, возникающих в работе системы инженерных барьеров безопасности. Дополнение научно-методического обеспечения формирования проектной технологической платформы строительства пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов данной процедурой позволяет с помощью математического аппарата комбинаторики определять как

наиболее опасные сочетания событий по выходу барьеров безопасности из строя и раннему распространению радионуклидов в окружающей среде, так и наиболее опасные сочетания событий, приводящие к раннему проникновению радионуклидов в грунты. Моделирование всех сценариев аварийных ситуаций с выделением критических комбинаций событий позволяет их прогнозировать и своевременно предотвращать.

9. Усовершенствованная методология и результаты исследований использованы при обосновании комплекса аналитических, эмпирических, технологических и технических составляющих проектных решений в области обращения с радиоактивными отходами на предприятиях ООО «СК «ИнжПроектСтрой», АО «Гиредмет», ФГУП «НО РАО», ООО «ИнТехПром», ООО «Семикс», ООО «Фундаментстрой», ФГБУ «Гидроспецгеология». Проведенные автором исследования в области обоснования и создания геокомпозитных материалов повышенной прочности, плотности и сульфатостойкости с низкими фильтрационными, миграционными свойствами, морозостойкостью с проектными решениями возведения сооружений и системы финальной изоляции в виде инженерных барьеров безопасности с высокими изоляционными характеристиками с использованием предложенных методических положений и оценочной модели позволили сформировать проектную технологическую платформу, наиболее адаптированную к условиям захоронения радиоактивных отходов и позволяющей сформировать наиболее высокий уровень устойчивого конкурентного преимущества.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

- в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Бамборин М.Ю., Мартыанов В.В., Каманин А.Н., Минин А.В. Рациональное использование лицензионных участков недр при обращении с жидкими радиоактивными отходами при их захоронении в геологических формациях. Радиоактивные отходы №1, 2023, с. 23.
2. Кузьмин Е.В., Маянов Е.П., Игин И.М., Минин А.В., Бамборин М.Ю., Калакуцкий А.В., Морозов А.А. Обоснование параметров технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в пространстве подземных рудников ПАО «ППГХО». Радиоактивные отходы, №1, 2022, с. 62-76.
3. Игин И.М., Минин А.В., Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Трофимова Ю.В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации. Радиоактивные отходы, №3, 2022, с. 50-60.
4. Игин И.М., Минин А.В., Кузьмин Е.В., Бамборин М.Ю., Спешиллов С.Л., Трофимова Ю.В. О возможных проявлениях горных ударов при сооружении ПИЛ и методах их предотвращения. Радиоактивные отходы, №4, 2022, с. 70-77.
5. Игин И.М., Минин А.В., Зубков А.А., Кузьмин Е.В., Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В. Возможности изоляции модульных сооружений ППЗРО термопластичными полимерами. Радиоактивные отходы, №1, 2023.
6. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешиллов С.Л., Хахунова М.М., Каманин А.Н., Минин А.В., Барышев А.В., Собко А.А., Доильница В.В. Обзор зарубежного опыта и результаты испытаний материалов на основе цемента для обеспечения долговременной безопасности хранилищ радиоактивных отходов. Радиоактивные отходы, №4, 2023, с. 62-71.
7. Бамборин М.Ю. Исследование влияния полимерных суперпластифицирующих добавок на прочностные свойства бетонов различных классов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2024. – № 1 (специальный выпуск 1). – С. 3-12.
8. Бамборин М.Ю. Исследование влияния полимерных суперпластифицирующих добавок на водонепроницаемость и морозостойкость бетонов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 1 (специальный выпуск 1). – С. 13-20.
9. Бамборин М.Ю. Исследование влияния полимерных суперпластифицирующих добавок на водопоглощение и сульфатную коррозию бетонов. Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 1 (специальный выпуск 1). – С. 21-31.

10. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешиллов С.Л., Минин А.В., Барышев А.В., Морозов А.А. Лабораторные испытания изолирующих свойств серобетона от радоновыделения из пастовой закладки на основе хвостов ГМЗ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2 (специальный выпуск 4). — С. 3–13.

11. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешиллов С.Л., Минин А.В., Барышев А.В., Морозов А.А. Применение серобетона при подземных горных работах. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2 (специальный выпуск 4). — С. 14-22.

12. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешиллов С.Л., Морозов А.А. Разработка технологии утилизации хвостов ГМЗ с пастовым сгущением на площадке рудника №6 ПАО «ППГХО». Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2 (специальный выпуск 4). — С. 23-31.

13. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешиллов С.Л., Минин А.В., Морозов А.А. Создание инженерных барьеров безопасности при долговременном хранении РАО в пространстве подземных рудников. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2 (специальный выпуск 4). — С. 32-40.

14. Бамборин М.Ю. Исследование влияния полимерных суперпластифицирующих добавок на уровень плотности бетонов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 3 (специальный выпуск 5). — С. 3–13.

15. Бамборин М. Ю., Шишкин Я. В. Анализ методов расчета устойчивости откосов и склонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 3 (специальный выпуск 5). — С. 14–25.

- прочие издания:

16. Кузьмин Е.В., Минин А.В., Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В. Система инженерных барьеров безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов. Безопасность труда в промышленности, № 6, 2022, с. 46-51.

17. Бамборин М.Ю. Исследование технологических характеристик элемента трубошпунтовой завесы и самозабуриваемых анкеров из полимерных композиционных материалов. Горная промышленность. – 2024. – №1. – С. 28–31.

Конференции:

18. Опыт закрепления грунтов оползнеопасных бортов ликвидируемых хвостохранилищ. Исследование влияния пластифицирующих добавок на механические характеристики и долговечность бетона. Бамборин М.Ю., Малинин А.С., Галактионова Е.Г., Токарева М.Ю. Труды II Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященной памяти академика Н.П. Сагина (РедМет-2022) (Москва, Россия, 23-25 ноября 2022) – Сборник тезисов С. 256-257.

19. Анализ характеристик минерального сырья и их влияние на формирование физико-механических характеристик бетонного камня, модифицированного глиной. Малинин А.С., Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В. Труды II Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященной памяти академика Н.П. Сагина (РедМет-2022) (Москва, Россия, 23-25 ноября 2022) – Сборник тезисов С. 266-268.

20. Разработка параметров технологии приповерхностного захоронения РАО с обеспечением их долговременной безопасности. Бамборин М.Ю., Игин И.М., Трофимова Ю.В. VII научная-техническая конференция «Экологические аспекты горного и перерабатывающего производства», (19-20 октября 2022, Москва) – Сборник тезисов С. 170-177.

21. Гидрогеологическое моделирование распространения радионуклидов в геологической среде при захоронении РАО. Трофимова Ю.В., Бамборин М.Ю., Тугушева Д.И. X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022», (26–30 сентября 2022, г. Санкт-Петербург) – Сборник тезисов С. 240.

22. Долговечность бетона при контакте с РАО. Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В., Малинин А.С., X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022», (26–30 сентября 2022, г. Санкт-Петербург) – Сборник тезисов С. 345.

23. Применение инновационных технологий в системе мониторинга пунктов захоронения радиоактивных отходов. Бамборин М.Ю. Всероссийская конференция с международным участием «Геохимия окружающей среды» (ГеОС-2022) (23-26 августа 2022 г., Москва, Россия) – Сборник тезисов С. 84.

24. Анализ международного опыта по формированию покрывающего экрана как барьера безопасности при закрытии пунктов захоронения РАО. Тугушева Д.И., Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В. Молодежная научно-практическая конференция "Материалы и технология в атомной энергетике" (Москва, Россия, 22 - 23 июня 2022) – Сборник тезисов С. 34.

25. Анализ физико-механических характеристик бетонного камня, модифицированного глиной, для создания барьера безопасности пункта захоронения РАО. Бамборин М.Ю., Трофимова Ю.В., Тугушева Д.И. Молодежная научно-практическая конференция "Материалы и технология в атомной энергетике" (Москва, Россия, 22 - 23 июня 2022) – Сборник тезисов С. 35.

26. Физическое моделирование барьера безопасности на основе глиносодержащих материалов для ограничения миграции радионуклидов из пункта захоронения РАО. Трофимова Ю.В., Бамборин М.Ю., Тугушева Д.И. Молодежная научно-практическая конференция "Материалы и технология в атомной энергетике" (Москва, Россия, 22 - 23 июня 2022) – Сборник тезисов С. 36.

27. Свойства эпоксиполисульфоновых матриц и армированных пластиков на их основе в условиях низкоскоростного ударного воздействия. Солодилов В.И., Корохин Р.А., Горбаткина Ю.А., Куперман А.М. (ИХФ РАН), Шапагин А.В. (ИФХЭ РАН), Бамборин М.Ю., 3 Савин В.Н. (АО «НИИГрафит») Научные чтения им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». (Москва, Россия, 6-7 сентября 2016) – Сборник тезисов С. 120.

28. Исследование влияния термической обработки на рентгеноструктурные характеристики и коэффициент теплопроводности углерод-углеродных композиционных материалов. Бамборин М.Ю. Всероссийская молодежная научная конференция "ИННОВАЦИИ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ". (Москва, Россия, 3-5 июня 2013) – Сборник тезисов С. 30.

29. Исследования влияния термической обработки на рентгеноструктурные характеристики и коэффициент теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала. Максимова Д.С., Бамборин М.Ю. Международная молодёжная научная конференция "XXXIX Гагаринские чтения". (Москва, Россия, 9-13 апреля 2013) – Сборник докладов С. 145.

30. Разработка сборных конструкций из УУКМ высокой теплопроводности. Бамборин М.Ю., Титова Н.В., Ярцев Д.В., Колесников С.А. Международная молодежная конференция "Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России". (Геленджик, Россия, 10-12 июля 2012) – Сборник докладов С. 96-97.

31. Исследование влияния структурных и технологических характеристик углеродных композитов на формирование уровня их теплопроводности. Бамборин М.Ю. 8-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». (Троицк, Россия, 25-28 сентября 2012) – Сборник тезисов С. 36-37.

32. Формирование уровня среднего коэффициента теплопроводности 3D углерод-углеродного композиционного материала. Колесников С.А, Воронцов В.А., Проценко А.К., Бамборин М.Ю. Научно-техническая конференция, посвященной 100-летию со дня рождения профессора С.З. Бокштейна «Создание и исследование конструкционных материалов для новой техники» (Москва, Россия, 18 января 2011 г.) – Сборник тезисов С. 25 – 26.

33. Взаимозависимость теплопроводности и электрического сопротивления углерод – углеродных композиционных материалов Бамборин М.Ю., Колесников С.А. Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии» (г. Москва, 16 – 18 ноября 2010 г.) – Сборник тезисов С. 78.