

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

*На правах рукописи*

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

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
д.т.н., профессор Е.В. Кузьмин

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ.....	16
1.1. Сложившиеся тенденции и закономерности в области захоронения радиоактивных отходов с использованием пунктов приповерхностного захоронения. Отечественный и зарубежный опыт .....	16
1.2. Модельное представление пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов.....	37
1.3. Анализ сведений о планируемых к захоронению РАО.....	43
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	44
ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	44
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ, ТРАНСФОРМАЦИИ И РАЗВИТИЯ МЕТОДОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОБОСНОВАНИЯ И ВЫБОРА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	46
2.1. Принципиальные особенности максимальной гидроизоляции ППЗРО с использованием инновационных конструктивных материалов с высокими прочностными и противofiltrационными свойствами .....	48
2.2. Блок-схема алгоритма проведения исследований в области выбора систем и способов конструктивного исполнения ППЗРО с позиций системотехнического подхода .....	49
2.3. Функциональная структура ППЗРО.....	63
2.4. Проектные параметры и характеристики материалов, обеспечивающих долговременную сохранность конструкционных элементов ППЗРО с оценкой их эксплуатационной устойчивости .....	66

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	129
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРОВ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	133
3.1. Разработка методических положений проектирования вертикального барьера долговременной безопасности на основе композиционного трубчатого шпунта с обоснованием проектных конструктивных параметров .....	133
3.2. Блок-схема алгоритма расчета технологических параметров вертикальной противofiltrационной завесы с анкерным креплением.....	142
3.3. Разработка методических положений проектирования горизонтального барьера долговременной безопасности на основе противofiltrационной завесы с технологией струйной цементации с обоснованием проектных конструктивных параметров.....	157
3.4. Блок-схема алгоритма расчета технологических параметров горизонтальной противofiltrационной завесы с технологией струйной цементации.....	168
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	185
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ППЗРО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТРУБОШПУНТОВОЙ И ГРУНТОЦЕМЕНТНОЙ ЗАВЕС .....	190
4.1. Модель геофилтрации (базовые дифференциальные уравнения) с критериями оптимальности и ограничениями .....	190
4.2. Моделирование геомиграционных потоков с используемыми целевыми функциями, критериями оптимальности и ограничениями. ....	191
4.3. Валидация, анализ и оценка результатов моделирования .....	193
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	199

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	201
5.1. Методический подход к процедуре оценки .....	201
5.2. Моделирование вариаций возможных сценариев проявлений аварийных ситуаций с оценкой кратко - и долгосрочных последствий .....	208
5.3. Прогнозирование сроков долговременной безопасности ППЗРО с учетом различных сценариев обеспечения их эксплуатационной устойчивости.....	212
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....	235
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	238
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	244
Приложение А .....	258
Приложение Б .....	262
Приложение В.....	277
Приложение Г .....	291



## ВВЕДЕНИЕ

**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: CIGEO (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 подземных 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 противofильтрационные 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 противofильтрационными 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 противοfiltrационной 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 противοfiltrационных характеристик;

- определить эффективность возведения инженерных барьеров безопасности - трубошпунтовой и грунтоцементной завес, с использованием прогнозных геоfiltrационной 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 - 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  $2456 \text{ кг/м}^3$ , 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  $2485 \text{ кг/м}^3$ , 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  $V/C=0,7$ , диаметр колонны - 0,8 м, 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 противифльтрационных завес во вмещающих породах со снижением уровня ионизирующего излучения и локализацией распространения радиоактивных веществ на прилегающих территориях.

**Методы исследований.** В работе использован комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение мирового опыта обращения с радиоактивными отходами; анализ теории и практики строительства приповерхностных хранилищ для РАО 3 и 4 классов; анализ и обобщение информации о материалах на основе цемента, их характеристик и стандартах их исследований; 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 противofильтрационных 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; надёжностью 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, практикой 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 (см. приложение Г):

1. ООО «СК «ИнжПроектСтрой», в технологии струйной цементации, г. Пермь, 2022г.
2. АО «Гиредмет» в технологии устройства противодиффузионной (противопожарной) 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 участии в проведении лабораторных исследований, организации и выполнении опытов, отборе и подготовке образцов, проб 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»); расчёте вертикальной и горизонтальной противofiltrационных 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»); подготовке и выполнении моделирования геофилтратационных и геомиграционных процессов, (внедрённого в 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 Минину А.В., Кузьмину Е.В., Красильникову В.Я., Спешилкову С.Л., Глаголеву А.В., Святовцу С.В., Куваеву А.А., Анисимову Н.А., Малинину А.Г., Малинину А.С., Тимергалиеву Н.А., Шишкину В.Я., Конусевичу В.И., Галактионовой Е.Г. и Токаревой М.Ю., 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.

# ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

## 1.1. Сложившиеся тенденции и закономерности в области захоронения радиоактивных отходов с использованием пунктов приповерхностного захоронения. Отечественный и зарубежный опыт

В главе рассмотрены исследования и практика захоронения низко - и среднеактивных отходов в приповерхностных сооружениях, оборудованных инженерными барьерами безопасности на территориях нескольких ведущих стран по использованию атомной энергии - Франции, Испании, Венгрии и России.

**Опыт приповерхностного захоронения во Франции.** Формирование системы обращения с РАО во Франции началось в 1960-х годах. До 1969 года РАО (среднеактивные радиоактивные отходы (САО), низкоактивные радиоактивные отходы (НАО)) находились в местах специального хранения, где они образовались – около АЭС. В 1979 году было учреждено Национальное Агентство по обращению с радиоактивными отходами - АНДРА (ANDRA) [1].

В 1967 году Французской комиссией по альтернативным источникам энергии и атомной энергии (CEA) была организована компания по захоронению РАО, которая являлась дочерней компанией «Калийные рудники Эльзаса» (Mines de Potasse d'Alsace). В 1968 году принято решение о строительстве первого приповерхностного пункта захоронения отходов НАО и САО - Сентре де Ла-Манш (Centre de la Manche), вблизи перерабатывающего завода Ла Аг. Активная эксплуатация объекта осуществлялась на протяжении 25 лет (1969-1994 гг., рис. 1.1). В 1991 году началось строительство кровли (покрывающего экрана для защиты от осадков хранящихся упаковок). В 1994 году произведено закрытие пункта и начата подготовка к этапу мониторинга (на период около 300 лет, рис. 1.2) [1].

В 2003 году указом национального агентства по обращению с радиоактивными отходами начат мониторинг. Всего в период 1969-1994 гг. в

пункте было захоронено более 525 000 м<sup>3</sup> РАО (1 469 265 упаковок). Характеристики пункта захоронения представлены в табл. 1.1.



Рисунок 1.1 - Эксплуатация пункта захоронения Сентре де Ла-Манш [2].



Рисунок 1.2 - Закрытый пункт захоронения Сентре де Ла-Манш [3].

Опыт эксплуатации Сентре де Ла-Манш был применён при разработке проекта второго пункта захоронения РАО в Сентре де Л'Об (Centre de L'Aube) (рис. 1.3). Пункт по захоронению РАО начал свою работу в 1992 году и запроектирован на 60 лет активной эксплуатации, объём хранилища 1 000 000 м<sup>3</sup> (420 камер для захоронения). Расположен в 40 км от населённого пункта Трое, в 200 км от Парижа. РАО доставляют на захоронение по железной дороге с организаций, образовавших их до терминала Бриени-ле-Шато, расстояние от пункта захоронения до терминала составляет 15 км. На этом участке транспортировка осуществляется по автомобильной дороге. По состоянию на 31.12.2013 захоронено 280 000 м<sup>3</sup> РАО (123 камеры). Характеристики пункта захоронения представлены в табл. 1.2 [1].

Таблица 1.1. Характеристики пункта Сентре де Ла-Манш [4].

№	Характеристики	
1	Общая площадь	14 га
2	Площадь пункта захоронения	10 га
3	Суммарный объём захороненных РАО	525 000 м <sup>3</sup>
4	Максимальный объём захоронения РАО	35 000 м <sup>3</sup> (1988 год)

Опыт эксплуатации Сентре де Ла-Манш был применён при разработке проекта второго пункта захоронения РАО в Сентре де Л'Об (Centre de L'Aube) (рис. 1.3).



а)



б)

Рисунок 1.3 - Этапы проектирования (а) и эксплуатации (б) пункта захоронения Сентре де Л'Об [5, 6].

Пункт по захоронению РАО начал свою работу в 1992 году и запроектирован на 60 лет активной эксплуатации, объём хранилища 1 000 000 м<sup>3</sup> (420 камер для захоронения). Расположен в 40 км от населённого пункта Трое, в 200 км от Парижа.

РАО доставляют на захоронение по железной дороге с организаций, образовавших их до терминала Бриени-ле-Шато, расстояние от пункта захоронения до терминала составляет 15 км. На этом участке транспортировка осуществляется по автомобильной дороге. По состоянию на 31.12.2013 захоронено 280 000 м<sup>3</sup> РАО (123 камеры). Характеристики пункта захоронения представлены в табл. 1.2 [1].

Таблица. 1.2. Характеристики пункта Сентре де Л'Об.

№	Характеристики	
1	Общая площадь	95 га
2	Площадь для захоронения	30 га
3	Максимальный объём захоронения РАО	21 900 м <sup>3</sup> (1996 год)
4	Среднегодовые объёмы поступления РАО в соответствии с проектом	30 000 м <sup>3</sup>
5	Средний объёмы поступления (факт)	15 000 – 20 000 м <sup>3</sup>

Сентре де Л'Об разделён на две зоны: контролируемую и неконтролируемую.

Контролируемая зона представляет собой модульные сооружения, состоящие из технологических модулей, где в соответствии с технологическими регламентами и нормами безопасности производится кондиционирование РАО, компактирование и дальнейшее цементирование, модули для временного хранения поступивших РАО, инженерные строения (ремонтный цех, резервуары для сбора дренажных вод) и контрольные ёмкости с системой трубопроводов по территории Сентре де Л'Об), административные строения [7, 8].

Неконтролируемая зона - это оставшаяся территория, расположенная за пределами физической защиты, у неё двойная функция. Первая: контроль, защита от несанкционированного проникновения гражданского населения на территорию пункта захоронения. Вторая - это социальная, чтобы избежать несанкционированных действий, на ней расположен Центр работы с общественностью, который проводит необходимые мероприятия по информированию населения о безопасности атомной энергетики, радиоактивных отходов и т.д., также этот центр проводит обзорные экскурсии для населения Франции, для повышения уровня информированности и исключения ложной

информации о экологическом состоянии Сентре де Л'Об.

АНДРА с 1984 по 1985 год провела большой объём аналитических и геологических исследований по поиску потенциально пригодных площадок к расположению нового пункта захоронения РАО, определены следующие административные департаменты: Об, Эндр и Вьенна, Мэн и Луара [9].

Департамент «Об» наиболее изучен с позиции геологии и гидрогеологии, особенно подробно была изучена потенциальная площадка рядом с г. Сулэн. В связи с этим было принято решение о расположении там нового пункта захоронения отходов. Выбранный участок имел преимущество – располагался на возвышенности, представлен преимущественно глинистой формацией. В отдельных частях разреза глина опесчанена.

Конструктивная схема пункта захоронения Сентре де Л'Об представляет собой модульное сооружение с передвижной (мобильной) крышей высотой 16 м., размер модулей  $20\text{м} \times 20\text{м} \times \sim 8\text{ м}$ . (рис. 1.4а).

Модульное сооружение изготавливается из специальных бетонов с длительным сроком эксплуатации, состоит из металлоконструкции, покрытой сверху кровельным профилированным листом, облицованной стеновыми профилированными листами, стоящей на рельсах для возможности передвижения над необходимым отсеком модульного сооружения. Между мобильной крышей и модульным сооружением передвигается козловой кран для загрузки в отсеки модуля контейнеров с радиоактивными отходами (рис. 1.4б). Мобильная крыша одновременно закрывает от атмосферных осадков полтора отсека, что обеспечивает безопасную работу в модульном сооружении на этапе разгрузки контейнеров, бочек с РАО перед отсеком и штабелирования внутри отсека.

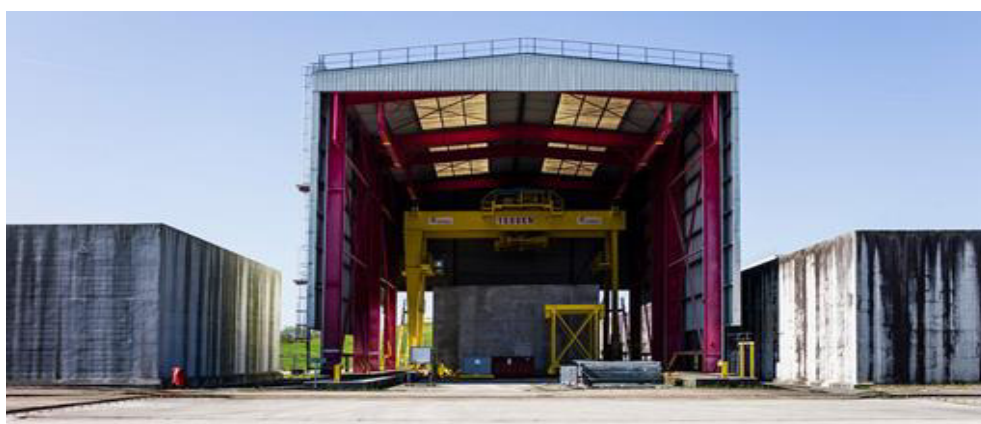
Как показано на рисунке 1.5, в модульное сооружение загружаются контейнеры двух типов: бетонные контейнеры, металлические бочки.

В контейнеры из бетона помещены упаковки с радиоактивными отходами (содержащие в структуре долгоживущие радионуклиды), контейнеры штабелируются в несколько ярусов внутри отсеков модулей. Свободное межконтейнерное пространство заполняется гравием (рис. 1.6, 1.7) [10].





а)



б)

Рисунок 1.4 – Модульное сооружение: а) вид сверху, б) вид сбоку [11-12].

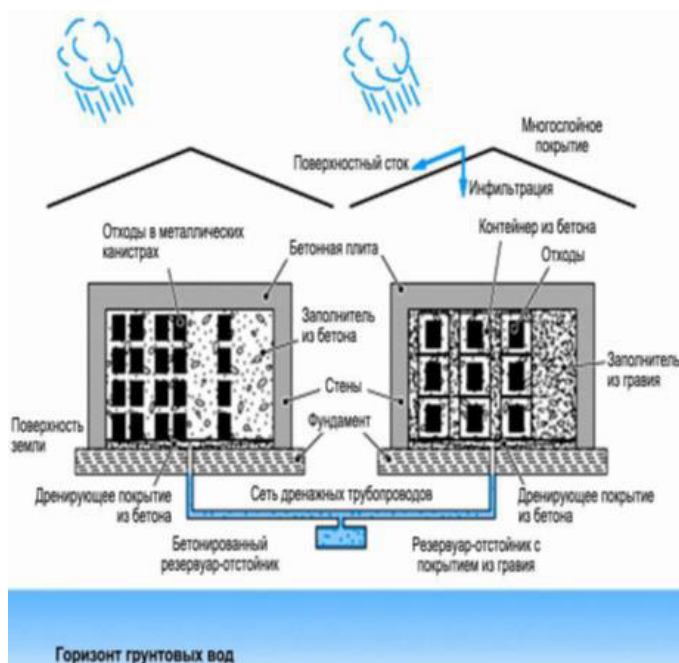


Рисунок 1.5 – Схема захоронения отходов в модульном сооружении [4].

В металлические бочки помещены радиоактивные отходы, содержащие в структуре короткоживущие радионуклиды. Бочки также устанавливаются, как и бетонные контейнеры в несколько ярусов, но перед установкой каждого последующего яруса свободное пространство между ними и поверх бочек заливается слоем цемента (рис. 1.6, 1.7) [10].



а)

б)

Рисунок 1.6 – Размещение: а) контейнеров и б) бочек с РАО [13-14].



а)

б)

Рисунок 1.7 - Заливка слоя цемента поверх: а) бетонных, б) металлических бочек с РАО [15].

По окончании заполнения отсека и заливки цементом отсек закрывается сверху бетонной плитой, далее покрывается гидроизолирующим материалом (раствор полиуретана), позволяющим предотвратить проникновение жидкости в законсервированный отсек части модуля.

После заполнения всех отсеков модульное сооружение покрывается многослойным грунтовым экраном, состоящим из:

- малопроницаемых слоёв;
- дренирующих слоёв для отвода инфильтрационного потока в систему сбора естественных осадков;
- плодородного слоя почвы с растительным покровом, имеющим поверхностную корневую систему. Растения данного типа позволят нивелировать риски, связанные с высыханием и растрескиванием малопроницаемых слоев экрана и разрушения от инфильтраций, а также обеспечат отвод в систему сбора естественных осадков.

С 1994 года АНДРА ведёт исследования по имитации покрывающего экрана и определению водопроницаемости, при разных толщинах экрана (60 см и 150 см), на основе песков и аптской глины.

Пункт захоронения Сентре де Л'Об решает три задачи безопасности:

1. Захоронение радиоактивных отходов – их финальной изоляции.
2. Захоронение радиоактивных отходов с задачей защиты гражданского населения от возможного негативного воздействия РАО, изоляции от возможного вмешательства в окружающую среду путём контроля целостности контейнеров, бочек с РАО, предотвращения процесса миграции радионуклидов. В период эксплуатации модульных сооружений эту функцию выполняет мобильная крыша совместно с секциями, в дальнейшем эту задачу выполняет законсервированная секция, покрытая бетонной плитой (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Модульные сооружения: законсервированные секции, секциями с защитной мобильной крышей, секции, подготовленные к заполнению [16].

Разработана дополнительная компенсирующая система отдельного водосбора, обеспечивающая изолирующие функции для модульных сооружений после их закрытия. Данная система производит отдельный сбор и контроль атмосферных осадков (вода дождевая и от талого снега), а также сбор всего объема воды, проникшей сквозь покрывающий экран. Далее она собирается у основания модульного сооружения и отводится по специальному трубопроводу в контрольные емкости. Предполагается, что данная система будет функционировать как минимум на протяжении всего периода мониторинга (300 лет) после закрытия пункта захоронения РАО.

3. Защита персонала, обеспечивающего работу Центре де Л'Об в период его эксплуатации. Допустимая дозовая нагрузка на персонал в соответствии с проектом и нормами законодательства Франции 5 мЗв/год.

**Практика приповерхностного захоронения РАО в Испании.** Создание системы обращения с РАО в Испании началось с введением статьи 38-бис Закона 25 «О ядерной энергии...» в 1964 году. Спустя почти 20 лет, на основании Королевского указа № 1522 было создано Национальное агентство по радиоактивным отходам. В его обязанности входил контроль за обращением РАО, эксплуатация пунктов захоронения РАО и вывод этих пунктов из эксплуатации [17, 18]. В 1988-1990 гг. началось проектирование и строительство модульных сооружений с ячейками для размещения контейнеров, а также исследования по их воздействию на окружающую среду (рис. 1.9) [19].

В 1992 году началась эксплуатация уникального объекта в Испании, приповерхностного пункта захоронения отходов РАО Эль Кабриль (El Cabril), который позволил решить проблему со сбором, захоронением НАО и САО. Объект расположен в муниципалитете Орначуэлос на северо-западе провинции Кордова. Место для строительства объекта выбрали по нескольким причинам: развитая инженерная инфраструктура (территории старого рудника), достаточно изученный участок с позиции геологии и гидрогеологии. С 1961 года в отработанные горизонты уже производилось захоронение небольших объемов НАО. Новый



комплекс был рассчитан на прием 50 000 м<sup>3</sup> не кондиционированных РАО или 35 000 м<sup>3</sup> кондиционированных РАО (рис. 1.10) [4, 17].

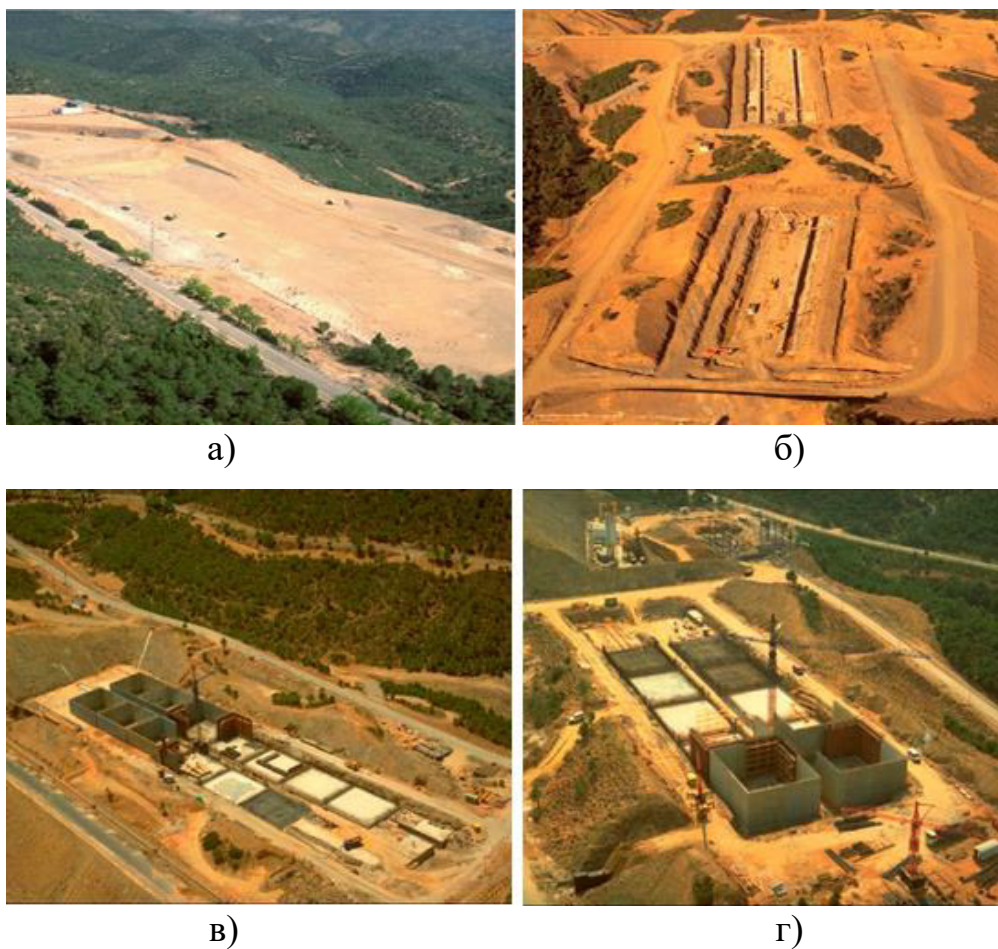


Рисунок 1.9 – Этапы: а) проектирования, б) подготовительных работ, (в, г) строительства пункта захоронения Эль Кабриль [19].



Рисунок 1.10 – Пункт захоронения РАО Эль Кабриль [20].

Приповерхностный пункт захоронения РАО состоит из четырёх зон [17]:

- первая зона для очень низкоактивных радиоактивных отходов (ОНАО), представляет собой траншею с легковозводимым строением (металлоконструкция,

покрытая тентом (рис. 1.11а, б));

- вторая зона для НАО и САО, представляет собой модульное сооружение с передвижной (мобильной) крышей, под которой установлен мостовой кран для размещения в секции контейнеров и бочек с РАО (рис. 1.12а, б);

- третья зона - для инженерных строений, в которых размещены ремонтный цех, цех для технологических операций по кондиционированию РАО;

- в четвертой зоне расположены административные строения и лаборатория по определению качества отверженных РАО (рис. 1.13).



Рисунок 1.11 - Сооружения для очень низкоактивных радиоактивных отходов: а) вид сверху, б) вид изнутри [21, 22].



Рисунок 1.12 - Модульное сооружение для низко- и среднеактивных отходов: а) вид сверху, б) вид сбоку [23, 24].

У пункта захоронения РАО Эль Кабриль разработана многобарьерная система безопасности, включающая (рис. 1.14) [25]:



- первый барьер, представляет собой контейнеры из бетона, в которых упакованы отвержденные или кондиционированные отходы;
- второй барьер, представляет собой секцию модульного сооружения (бетонная плита пола, стены и покрывающая плита), верхний многослойный покрывающий экран и независимую систему контроля инфильтрации, обеспечивающую отвод атмосферных осадков от модульного сооружения;
- третий барьер, естественный, представляет собой вмещающие породы, которые позволяют ограничить движение радионуклидов в случае разрушения первых двух барьеров и процесса выщелачивания РАО.



Рисунок 1.13 - Административные здания, лаборатория, Эль Кабриль [26].

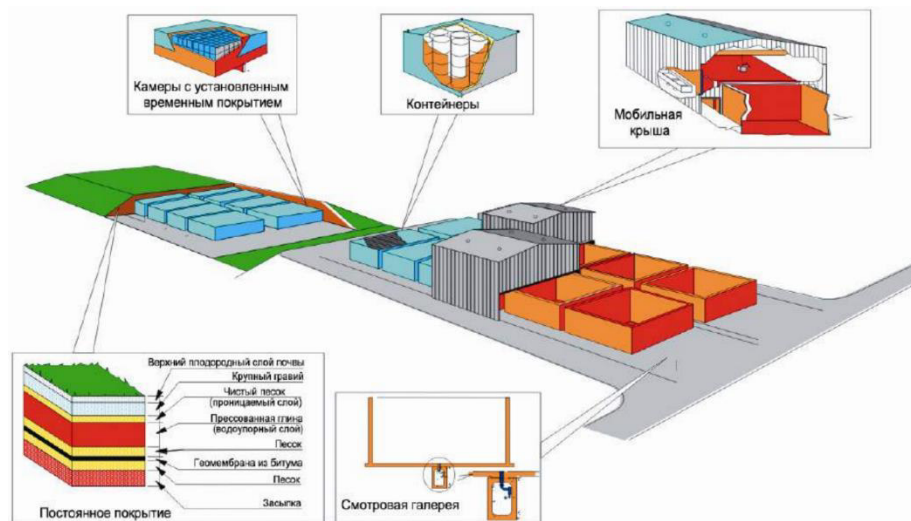


Рисунок 1.14 - Система безопасности приповерхностного пункта захоронения РАО Эль Кабриль [4].

Так как приповерхностный пункт захоронения Эль Кабриль представляет собой комплекс с двумя типами захоронения, персонал, обеспечивающий его

работу, использует отличные друг от друга технологические регламенты.

НАО и САО перед захоронением отверждают, затем упаковывают в бетонный контейнер и размещают в секциях модульного сооружения пункта приповерхностного захоронения, объём каждой секции составляет 320 контейнеров (рис. 1.15а).



а)

б)

Рисунок 1.15 - Пункт захоронения радиоактивных отходов: а) модульного типа, б) траншейного типа [27, 28].

ОНАО в бочках перед захоронением упаковываются в клетки по 4 шт., затем штабелируются в три ряда и засыпаются песчано-гравийной смесью в пункте захоронения траншейного типа (рис. 1.15б). ОНАО, захороненные подобным образом, обладают удельной активностью в диапазоне от 1 до 100 Бк/г, источник образования данных отходов – материалы после вывода из эксплуатации ядерных установок.

В таблице 1.3 представлены объёмы ОНАО, САО и НАО, которые приняты в приповерхностный пункт захоронения отходов Эль Кабриль по состоянию на конец 2013 года. Имеется дефицит, так как практически выбраны все проектные мощности объекта. Для увеличения мощностей необходимо провести административные мероприятия, либо разработать проект нового объекта.



Таблица 1.3. Объем ОНАО, САО и НАО, размещенных в пункте захоронения Эль Кабриль [4].

Наименование	Объем ОНАО, м <sup>3</sup>	Объем НАО и САО, м <sup>3</sup>
Временное хранение	570	586
Захоронение	7 612	29 602

### **Опыт приповерхностного захоронения РАО в Венгрии**

Формирование системы обращения с РАО в Венгрии началось в 60-х годах, первый опыт захоронения РАО (пункт захоронения Солимар (Solymár) оказался неудачным ввиду отсутствия требований, норм для подбора площадки и входного контроля поступающих РАО. В 1980 году данный пункт захоронения отходов был закрыт и прекращены все мероприятия по выводу его из эксплуатации [29-30].

В 1976г. был открыт новый пункт захоронения отходов Пуспоксзилаги (Püspökszilágy, рис. 1.16), в который в дальнейшем перезахоранивали РАО из Солимар, вид данного пункта захоронения – бетонные траншеи и колодцы.



Рисунок 1.16 - Пункта захоронения РАО Пуспоксзилаги [31].

Пункт захоронения состоит из двух зон:

- в первой зоне расположены административные здания, гараж, хозяйственные и технологические строения (рис. 1.17);
- вторая зона представляет собой строения для временного хранения отходов, завод по кондиционированию, складские помещения завода (рис. 1.18, а) и зоны финальной изоляции (бетонированные траншеи, разделённые на секции и неглубокие колодцы) (рис. 1.18, б)).



Рисунок 1.17 – Административно-хозяйственные и технологические строения [31].



а)

б)

Рисунок 1.18 - а) строения для временного хранения отходов, завод по кондиционированию, б) зона финальной изоляции РАО [31].

У пункта захоронения Пуспоксзилаги разработана многобарьерная система безопасности, включающая (рис. 1.19):

- первый барьер, представляющий собой отверждённую цементную матрицу с РАО;
- второй барьер – стенки контейнера;
- третий барьер, представляющий собой секцию сооружения (бетонная плита пола, стены и покрывающая плита);
- четвёртый барьер – естественный, представляет собой вмещающие породы, которые позволяют ограничить движение радионуклидов в случае разрушения первых трёх барьеров и процесса выщелачивания РАО.

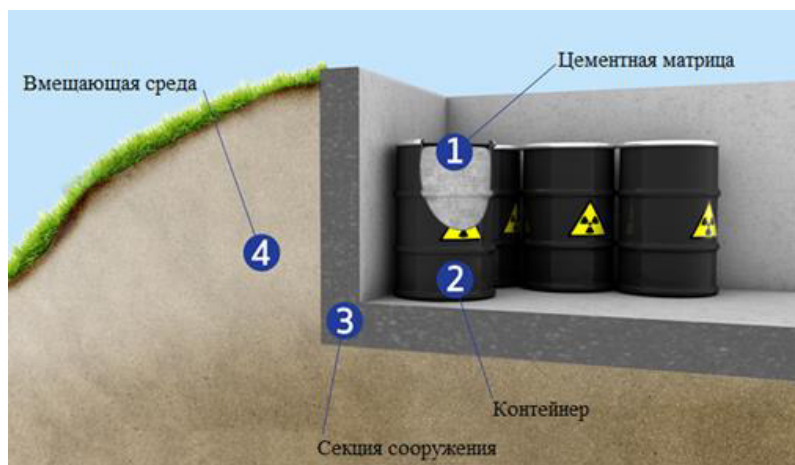


Рисунок 1.19 - Система безопасности пункта захоронения РАО  
Пуспоксзилаги [32].

РАО с пункта захоронения Солимар (представлены на рисунке 1.20 а, б), перед захоронением упаковывают в контейнер-бочку, затем заливают цементной матрицей, отверждают и размещают в секциях пункта захоронения (рис. 1.20 в).



а)

б)



в)

Рисунок 1.20 - а) отходы с пункта Солимар, б) процесс перезахоронения  
РАО, в) заполнение секции пункта захоронения Пускозилаки [33-35].

РАО с пункта захоронения Солимар (представлены на рисунке 1.20 а, б), перед захоронением упаковывают в контейнер-бочку, затем заливают цементной матрицей, отверждают и размещают в секциях пункта захоронения (рис. 1.20 в).

В таблице 1.4 представлены плановые объёмы РАО, которые будут приняты в приповерхностный пункт захоронения Пуспоксилаги.

В 1993 году была разработана национальная программа по обращению с РАО для Венгерской атомной энергетики. В программе были отражены все ключевые проблемы, которые необходимо решить для безопасного использования атомной энергии и разрешение проблемы, связанной с образованием и захоронением НАО и САО.

Все вопросы разделены на три больших блока. Первый блок посвящен предварительным исследованиям территории Венгрии, в нём рассматривались более 80 потенциальных площадок, 49 из них под ППЗРО и 32 под строительство пункта геологического захоронения. Второй блок посвящен потенциальному выбору регионов, были определены по три площадки под ППЗРО (Diosbereny, Nemetker и Udvari) и под пункт геологического захоронения (Bataapati, Moragy и Sarszentlőrinc), а также проведению общественных обсуждений и расчёту экономической целесообразности расположения пункта захоронения в выбранных регионах. Третий блок посвящен выбору площадки для сооружения пункта захоронения и проведению первых полноценных исследований.

Таблица 1.4. Характеристики пункта захоронения Пуспоксилаги [31].

№	Характеристики	
1	Максимальный объём захоронения РАО (тип хранения А)	5040 м <sup>3</sup>
2	Максимальный объём для захоронения органических растворителей (тип хранения С)	12 м <sup>3</sup>
3	Количество колодцев для захоронения РАО диаметром 40/100/200 мм, глубиной 6 м (тип хранения В, D)	16/16/4 шт.

### **Опыт приповерхностного захоронения РАО в России.**

Началом создания системы обращения с РАО в РФ можно считать выпуск Федерального закона «Об использовании атомной энергии» (№170-ФЗ от 21.11.



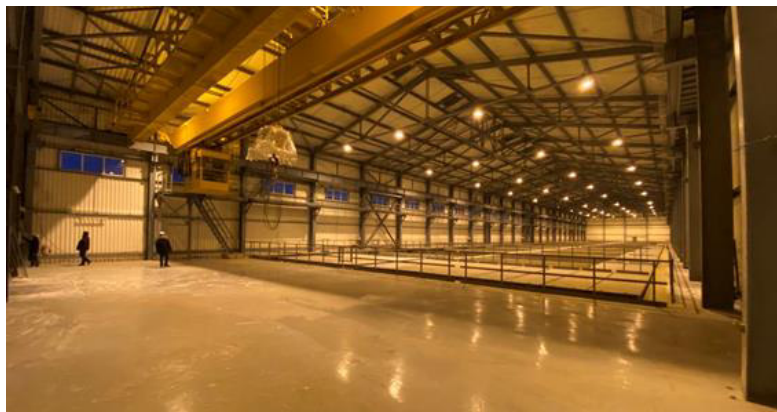
1995 г.). Спустя 16 лет был выпущен дополнительный документ, определяющий обращение с РАО «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты» (№190-ФЗ от 11.07. 2011 г.). Решением Правительства РФ № 384-р от 20.03. 2012 г. ФГУП «НО РАО» определено национальным оператором по обращению с радиоактивными отходами [36-39].

Последним построенным и введённым в эксплуатацию приповерхностным пунктом захоронения твердых радиоактивных отходов ФГУП «НО РАО» является отделение «Новоуральское» филиала «Северский». Данный объект предназначен для захоронения РАО 3 и 4 классов (в соответствии с Постановлением правительства РФ от 19.10.2012 № 1069) [40].

Конструктивно схема пункта захоронения отделения «Новоуральское» похожа на французскую и испанскую, она представляет собой модульное сооружение (рис.1.21) с секциями для расположения в них РАО (рис.1.22 а).



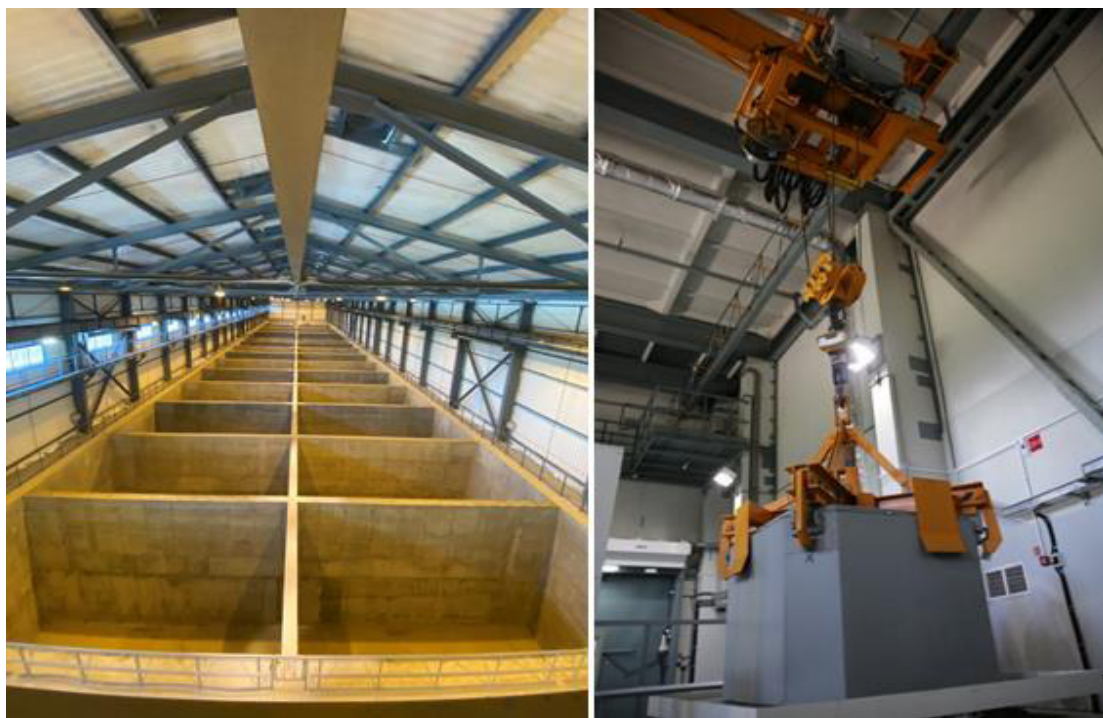
а)



б)

Рисунок 1.21 - Модульное сооружение: а) вид сбоку, б) вид изнутри [41].

Всё модульное сооружение находится внутри здания на основе металлокаркаса со стеновыми профилированными листами повышенного уровня ответственности, под крышей установлен мостовой кран (рис.1.22 б), для размещения в секции контейнеров и бочек с РАО (рис.1.23) [42]. Степень заглубления модульных сооружений – от нуля до половины высоты (расположены на склоне).



а)

б)

Рисунок 1.22 - а) Секции модульного сооружения, б) мостовой кран [43].

Новоуральское ППЗРО состоит из 4 модульных сооружений для захоронения РАО, инженерно-административного здания (в нём располагаются пост охраны, пункт дезактивации автотранспорта и оборудования, санпропускник, административные помещения), инженерно-технические сооружения.

У пункта захоронения также разработана барьерная система безопасности (инженерные барьеры), включающая в себя:

- первый барьер – железобетонные контейнеры, в которых упакованы радиоактивные отходы;
- второй барьер – гидроизолирующий слой глины;

- третий барьер – секция модульного сооружения (бетонная плита пола, стены и покрывающая плита), битумная гидроизоляция;
- четвёртый барьер – глиняный замок по контуру модульного сооружения;
- пятый барьер – верхний многослойный покрывающий экран (бетонная плита, бентонит, песок, дренажный слой, плодородный слой почвы с растительным покровом);
- естественный барьер – вмещающие горные породы.

Характеристики пункта захоронения представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Характеристики ППЗРО Новоуральское [42].

№	Характеристики	
1	Общая площадь	4,65 га
2	Габаритные размеры карт: карта 10 карта 11 карта 12 карта 13	- 131,9 х 24,4 м; 131,9 х 24,4 м; 52,4 х 24,4 м.
3	Количество отсеков в картах карта 11 карта 12 карта 13	40 отсеков 40 отсеков 16 отсеков
4	Максимальный объём захоронения РАО 3 и 4 класс: карта 10 карта 11 карта 12 карта 13	54 289,1 м <sup>3</sup> 14 979,0 м <sup>3</sup> 16 394,9 м <sup>3</sup> 16 394,9 м <sup>3</sup> 6 520,3 м <sup>3</sup>
6	Объём захоронения РАО в год (с учетом объема контейнеров) 3 класс 4 класс	4 500 м <sup>3</sup> /год; ~1800 м <sup>3</sup> /год; ~ 2700 м <sup>3</sup> /год.

Система захоронения РАО состоит из четырёх модульных сооружений №№ 10, 11, 12 и 13, система предусматривает очередность строительства модулей. Размещение РАО в ППЗРО происходит в контейнерах следующих типов:

3 класс – невозвратный защитный контейнер (НКЗ), НЗК-МР, НЗК-150-1,5П, НЗК-Радон (рис. 1.23 а);

4 класс – контейнер металлический защитный (КМЗ), НЗК-МР, Крад-1.36, бочка

(имеющая сертификат соответствия как промышленная упаковка ПУ-2, рис. 1.23 б).

РАО поступают в ППЗРО при помощи автотранспорта (рис. 1.24 а, б).



а)

б)

Рисунок 1.23 – Контейнеры для РАО а) 3 класса, б) 4 класса [43].



а)

б)



в)

г)

Рисунок 1.24 – Контейнеры для РАО а) 3 класса, б) 4 класса [43].

Разгрузка автотранспорта выполняется при помощи козлового крана или автопогрузчика (1.24 в, г).



Проектный срок эксплуатации ППЗРО (срок размещения РАО на захоронение) ~ 10 лет.

Период проведения мониторинга состояния ППЗРО после закрытия будет обоснован в проекте постэксплуатационного мониторинга ППЗРО, разрабатываемом перед закрытием ППЗРО.

У пункта захоронения РАО, отделение «Новоуральское» аналогичные задачи безопасности пунктам захоронения Сентре де Л'Об, Эль Кабриль:

1. Захоронение радиоактивных отходов с задачей финальной изоляции.
2. Захоронение радиоактивных отходов с задачей защиты гражданского населения и защиты окружающей среды от воздействия РАО.
3. Защита персонала, обеспечивающего работу отделения «Новоуральское» в период его эксплуатации.

## **1.2. Модельное представление пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов**

В соответствии со статьёй 87 земельного кодекса РФ площадка для размещения ППЗРО должна находиться на землях с назначением «земли промышленности и иного специального назначения», санитарно-защитная зона ППЗРО в соответствии с п. 3.3.1 СП 2.6.1.799-99 «классификация радиационных объектов по потенциальной опасности» [44] относится к III категории опасности (опасность ограничена территорией объекта), зона наблюдений для подобных объектов не устанавливается, площадь санитарно-защитной зоны объекта 0,43 км<sup>2</sup> [45].

Потенциальный план площадки ППЗРО представлен на рисунке 1.25. Как видно из плана, ППЗРО состоит из 4 модульных сооружений (заглубленные монолитные железобетонные сооружения), инженерных и административных зданий. Одно модульное сооружение состоит из 4 зеркально расположенных секций для хранения РАО с въездным проёмом, каждый состоит из 3 блоков для расположения в них контейнеров. Размер модулей ~80м × ~70м × ~6,5м, между блоками собрана металлоконструкция – крыша для защиты от естественных

осадков. На плане (рисунок 1.25) изображены дороги и пути движения автотранспорта и спецтехники. Сведения о проектной мощности ППЗРО приведены в таблице 1.6.

При условии двухсменного графика работы, период заполнения одного модульного сооружения составит ~ 1 год. После заполнения модульных сооружений запланирован демонтаж кровли с металлоконструкцией, и замоноличивание въездных проёмов в секции хранения РАО, нанесение гидроизолирующего покрытия на стены модульного сооружения и установка покрывающего гидроизолирующего экрана [45].

Таблица 1.6. Сведения о проектной мощности ППЗРО [45].

Показатель	Общее количество
Ориентировочное количество упаковок РАО в ППЗРО шт., в т.ч.: в 1 модульном сооружении	26 000 6 500
Ориентировочный объем РАО в ППЗРО с учетом внешних габаритов упаковок РАО, м <sup>3</sup> , в т.ч: в 1 модульном сооружении	60 000 15 000

Для обеспечения долговременной безопасности захоронения РАО (в соответствии с НП-100-17 [46]), а также стабилизации контейнеров с РАО, установленных друг на друга в несколько ярусов, предусмотрено заполнение свободного межконтейнерного пространства буферным гидрофильным материалом (глиняный порошок, бентонитовые гранулы). Засыпка производится между контейнерами с РАО, стенами коридора модульного сооружения, верхним перекрытием и контейнерами с РАО. Далее выполняется подготовка модульного сооружения и установка верхнего многослойного покрывающего экрана [45].

У пункта приповерхностного захоронения РАО 3 и 4 классов предусмотрена система инженерных барьеров безопасности, включающая (рис. 1.26) [46, 47, 48]:

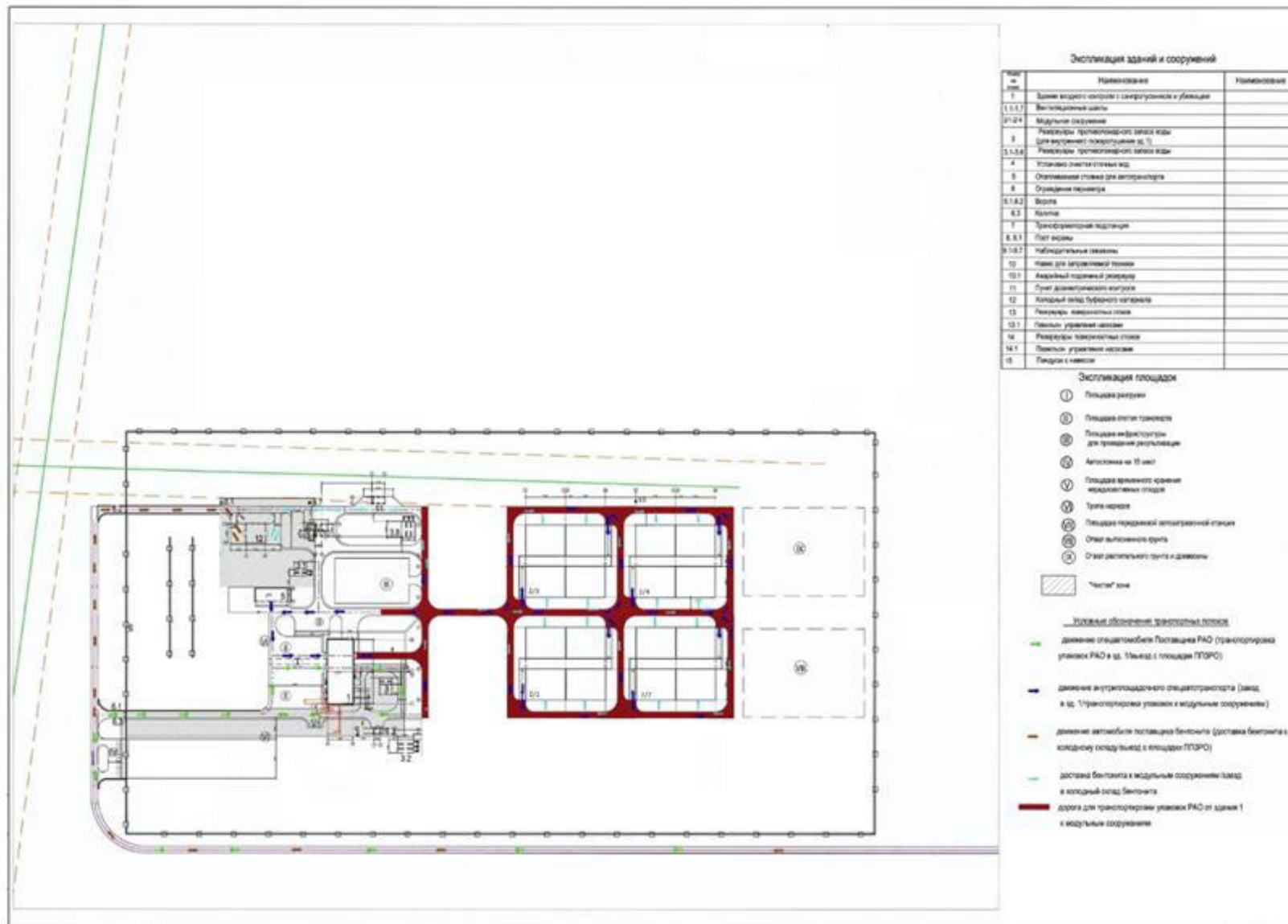


Рисунок 1.25 - План площадки ППЗРО.

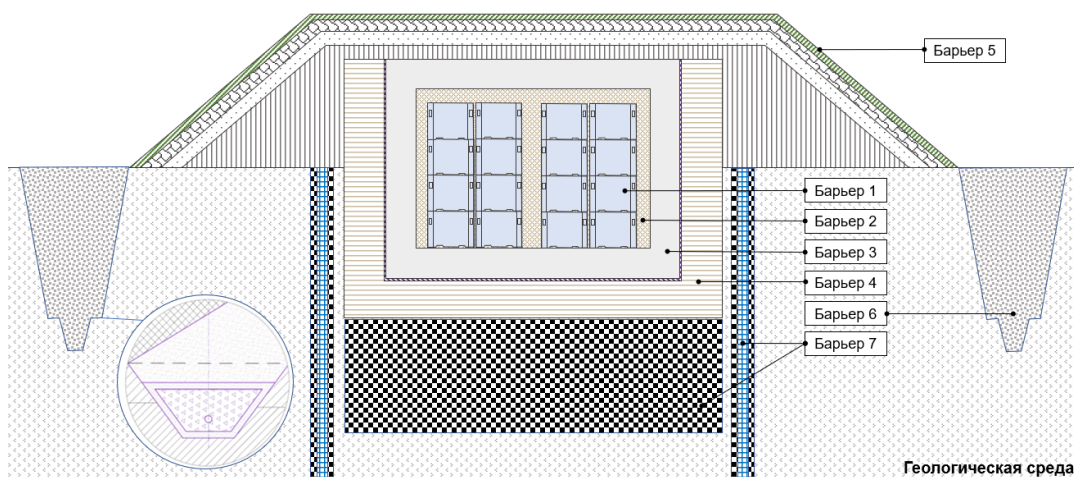


Рисунок 1.26 - Система инженерных барьеров безопасности ППЗРО [48]: 1 барьер – контейнеры с РАО, 2 барьер – буферный материал на основе природных глин, 3 барьер – бетонные сооружения стен, дна и перекрытий модульных сооружений (МС), 4 барьер – глиняный экран и бентонитовые маты по периметру МС, 5 барьер – покрывающий гидроизолирующий экран, 6 барьер – дренажная система, 7 барьер – шпунтовая и грунтоцементная завесы.

**Первый барьер** – стенки железобетонных контейнеров, в которых упакованы радиоактивные отходы (НЗК-МР, НЗК-Радон, НЗК-150-1,5П, НЗК-П, КМЗ, Крад-1,36, КРАД-3,0, ЖБУ, ЖЗК-I, ЖЗК-II, ЖЗК, бочки металлические, фильтр-контейнеры и их аналоги). Характеристики контейнеров приведены в Приложении А таблица 1. Срок службы, контейнеров как инженерного барьера НЗК-МР, НЗК-Радон, НЗК-150-1,5П, НЗК-П, ЖБУ, ЖЗК, ЖЗК-1, ЖЗК-2, в условиях захоронения в модульном сооружении, не менее 300 лет в соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 51824-2001 «Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона» [49]. Но при расчётах долговременной безопасности принимаются показатели срока службы вышеуказанных контейнеров не более 100 лет. У контейнеров КМЗ, Крад-1,36, Крад-3,0 срок службы значительно ниже за счёт активного влияния коррозии. В случае КМЗ срок службы составляет не менее 50 лет, в случае Крад-1,36, Крад-3, - не менее 30 лет. Бочки, фильтр-контейнеры и биг-бэги не рассматриваются в качестве инженерных барьеров или составной части барьера безопасности, в связи

с их крайне коротким сроком службы, отсутствием герметичности, низкой механической прочностью. Целостность контейнеров с РАО сохраняется в течение всего срока эксплуатации ППЗРО, по завершению эксплуатации защита контейнеров обеспечивается барьерной системой безопасности и вмещающей геологической средой.

**Второй барьер** – буферный гидрофильный материал на основе глиняных гранул, которым заполняют свободное межконтейнерное пространство и всё свободное пространство секции модульного сооружения. Данный барьер выполняет противодиффузионную, противомиграционную функцию на протяжении 300 лет.

**Третий барьер** – секции модульного сооружения (железобетонная плита пола, стены, перекрытия и покрывающая плита). Срок службы секции конструкций модульного сооружения – 100 лет (в соответствии с СП 63.13.330-2012 [50], ГОСТ 27751-2014 [51], ГОСТ 31384-2008 [52]).

**Четвертый барьер** – глиняный замок (экран), бентонитовые маты по контуру модульного сооружения (стены, дно, перекрытие). Глиняный замок под дном не менее 1000 мм, данный элемент барьера выполняет изолирующую функцию на протяжении не менее 500 лет. Бентонитовые маты: толщина ~10 мм, данный элемент барьера выполняет изолирующую функцию на протяжении всего срока эксплуатации ППЗРО при сохранении целостности мата.

**Пятый барьер** – верхний многослойный покрывающий экран (гидроизолирующий экран из глины, дренажный слой из гравийно-песчаной смеси (поверх глины), слой из дробленого камня, слой из суглинка и почвенно-растительного покрова). Данный барьер выполняет гидроизолирующую функцию на протяжении 300 лет, а также предотвращение проникновения атмосферных осадков внутрь, отвод атмосферных осадков с поверхности модульного сооружения, защиту от внешних механических воздействий (разрушение гидроизоляционного слоя от проникновения растений, животных, человека), поддержание естественного уровня влаги в глинистых элементах, консервирующих покрытий для предотвращения эрозии и гидроизолирующих

свойств элементов барьера. Характеристики верхнего многослойного покрывающего экрана приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Характеристики элементов защитного покрывающего экрана [45].

№	Элемент защитного экрана	Мощность, м	Характеристика
1	Гидроизолирующий экран из глины	1	Коэффициент фильтрации ( $K_f$ ), не более $1 \cdot 10^{-5}$ м/сут
2	Дренажный слой (поверх глины) из гравийно-песчаной смеси	0,5	—
3	Защитный слой из дробленого камня	0,5	Крупность 15-20 см
4	Защитный слой из суглинка с почвенно-растительным покровом	0,65	—

**Шестой барьер** (дополнительный) – дренажная система для отведения от ППЗРО поверхностных и подземных вод, создается в соответствии с условиями расположения ППЗРО на местности. Наиболее эффективны дренажные системы при наличии уклона. Резервная дренажная система возводится при увеличении притока вод для поверхностной инфильтрации верховодки или грунтовых вод. Модульные сооружения ППЗРО должны быть сухими максимально долгий период времени, это предотвратит преждевременное разрушение инженерных барьеров безопасности и отсрочит выход радионуклидов во внешнюю среду.

**Седьмой барьер** (дополнительный) – шпунтовая и грунтоцементная завесы вокруг модульных сооружений ППЗРО, возводимые как при строительстве и эксплуатации ППЗРО, так и вокруг закрытого ППЗРО.

Седьмой барьер является предметом исследований настоящей работы.

### 1.3. Анализ сведений о планируемых к захоронению РАО

Сведения о проектной мощности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов с разделением на 3 и 4 классы приведены в таблице 1.8 [45].

Допустимая суммарная активность РАО, захораниваемых в модульное сооружение ППЗРО:

- по бета-излучающим радионуклидам -  $8,5 \cdot 10^{17}$  Бк;
- по альфа-излучающим нуклидам (включая трансурановые) -  $2,3 \cdot 10^{13}$  Бк.

Радионуклидный состав РАО, планируемых для размещения в модульных сооружениях ППЗРО, представлен в таблице 1.9.

Таблица 1.8. Сведения о проектной мощности ППЗРО [45].

Показатель	Общее количество	3 класс	4 класс
Ориентировочное количество упаковок РАО в ППЗРО шт., в т.ч.: в 1 модульном сооружении	26 000 6500	3 200 800	22 800 5700
Ориентировочный объем РАО в ППЗРО с учетом внешних габаритов упаковок РАО, м <sup>3</sup> , в т.ч: в 1 модульном сооружении	60 000 15000	11 200 2800	48 800 12200

Таблица 1.9. Радионуклидный состав РАО [45].

Тип излучателя	Радионуклидный состав
$\beta, \gamma$ –излучатели	<sup>137</sup> Cs; <sup>134</sup> Cs; <sup>90</sup> Sr; <sup>60</sup> Co; <sup>3</sup> H; <sup>63</sup> Ni; <sup>54</sup> Mn; <sup>97</sup> Nb; <sup>94</sup> Nb; <sup>99</sup> Tc; <sup>129</sup> I; <sup>14</sup> C; <sup>36</sup> Cl; <sup>55</sup> Fe*
$\alpha$ –излучатели	<sup>238</sup> Pu; <sup>239</sup> Pu**; <sup>238</sup> U; <sup>235</sup> U**; <sup>241</sup> Am, <sup>244</sup> Cm**; <sup>226</sup> Ra; <sup>230</sup> Th; <sup>232</sup> Th; <sup>237</sup> Np

\*возможно включение в РАО других короткоживущих изотопов  $\beta, \gamma$  – излучателей: <sup>22</sup>Na, <sup>57</sup>Co, <sup>65</sup>Zn, <sup>106</sup>Ru, <sup>125</sup>Sb, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu, <sup>210</sup>Pb.

\*\*возможно включение в РАО других изотопов урана, плутония, кюрия.

Рекомендуемый перечень контейнеров для захоронения РАО классов 3 и 4 представлены в Приложении А, таблица 1 [45]. Форма РАО, планируемого к приёму на захоронение, химический состав, представлены в Приложении А,

таблица 2 [45]. Характеристики упаковок РАО 3 и 4 класса, нормы загрузки контейнеров и объемная плотность ядерных делящихся нуклидов на в РАО (на 1 см<sup>2</sup>) Приложении А, таблица 3 [45].

Не допускается прием на захоронение контейнеров с РАО в случае, когда степень заполнения контейнера менее 80 %, средняя плотность материала заполнения контейнера менее 800 кг/м<sup>3</sup>, масса заполненного контейнера более 10 тонн.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

Объем накопленных радионуклидов, образующихся после отработки тепловыделяющих элементов в ядерных реакторах АЭС, объектов использования атомной энергии, отходов гидрометаллургической переработки урановых руд составляет более 2,5 млрд. тонн. Ведущие страны, использующие атомную энергию, считают проблему изоляции РАО главной проблемой современного этапа развития атомной энергетики. Тенденции в возведении ППЗРО – это строительство частично заглубленных в грунты зданий – модульных сооружений ППЗРО, защищенных от влияния поверхностных и грунтовых вод, содержащих сульфаты, разрушающие бетон.

## **ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В соответствии с этим формулируются следующие 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 противofильтрационной завесы в горных породах вокруг объектов финальной изоляции РАО, для проектирования и создания инженерных барьеров, предотвращающих коррозионные процессы в модульных сооружениях при долгосрочной эксплуатации;

- установить оптимальные параметры технологии при проектировании и создании грунтоцементной завесы в основании модульных сооружений ППЗРО на основе струйной цементации для улучшения нормативных противofильтрационных характеристик модульных сооружений, предотвращения проникновения долгоживущих малосорбируемых радионуклидов в породный массив, обеспечения долговременной локализации РАО в пределах ППЗРО;

- 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.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ, ТРАНСФОРМАЦИИ И РАЗВИТИЯ МЕТОДОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОБОСНОВАНИЯ И ВЫБОРА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Проектирование горнотехнических систем охватывает большой спектр важнейших отраслей промышленности, это добыча полезных ископаемых – разработка рудных, угольных месторождений, горной химии, строительство подземных сооружений, включая тоннели, хранилища, станции и перегоны метрополитена. Основополагающий вклад в развитие и совершенствование горнотехнических систем внесли известные советские и российские ученые М.И. Агошков, Р.П. Каплунов, Д.М. Бронников, А.А. Борисов, В.Р. Именитов, И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, Д.Р. Каплунов, 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 времени своего существования, сотни и тысячи лет. Исследованиям по обоснованию технологии возведения и эксплуатации, 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. Познизова, 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. Баринова, В.В. Мартыанова, С.В. Святовца, В.И. Конусевича, Н.А. Анисимова, А.С. Малинина, В.Я. Шишкина, А.А. Куваева, А.С. Волкова, Ю.В.

Трофимовой, С.М. Лащенко, 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.

Приповерхностному захоронению подлежат радиоактивные отходы, отнесенные к классам 3, 4 и 6 по классификации, утвержденной Постановлением Правительства от 19.10.2012 № 1069 [40]. Принципы обеспечения безопасности при обращении с РАО на ППЗРО изложены в требованиях НП-055-14 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» [47].

Структура приповерхностного пункта захоронения отходов представлена в п. 1.2.1. и на рис. 2.1 [54]. Применяемые материалы в конструкции ППЗРО можно разделить на три блока:

1. Цементосодержащие материалы (бетон): стенки контейнеров, сооружения стен, днища и перекрытий модульных сооружений.
2. Глиняный материал: глиняный порошок, гранулы, заполняющие свободное пространство в отсеках, глиняный экран, бентонитовые маты по периметру (стены, дно, перекрытие, гидроизолирующий экран) модульных сооружений.
3. Покрывающий гидроизолирующий экран: слой глины, дренажный слой (поверх глины) из гравийно-песчаной смеси, защитный слой из дробленого камня, защитный слой из суглинка и почвенно-растительного покрова.

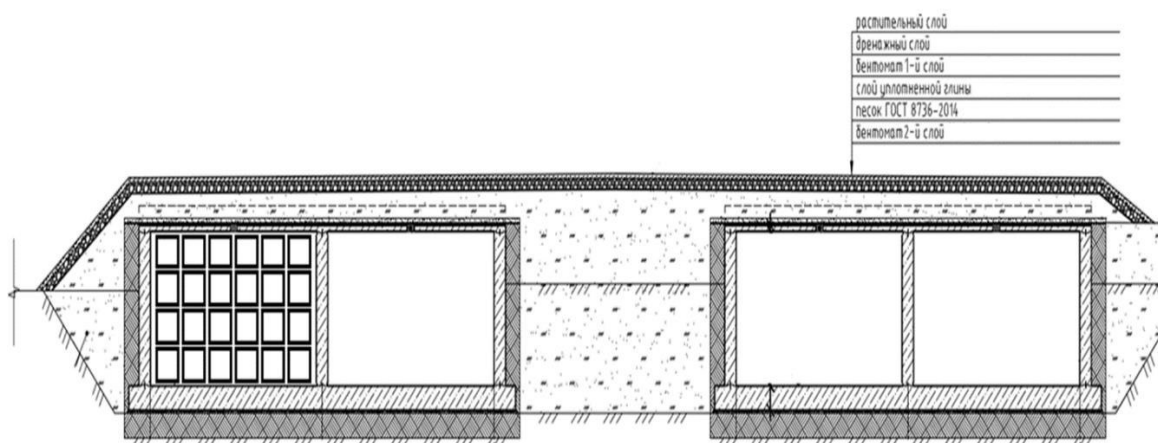


Рисунок 2.1 – Структура ППЗРО [54].

Последовательность этапов строительства:

1. Геодезические работы, в соответствии с п.4.4 СП 48.1333.2011 [55] заказчиком (застройщиком) должны быть выполнены работы по созданию на стройплощадке геодезически разбивной основы;
2. Установка вертикальной противofильтрационной завесы №1 по контуру санитарной защитной зоны;
3. Установка вертикальной противofильтрационной завесы №2 по контуру ППЗРО и горизонтальной противofильтрационной завесы технологией струйной цементации внутри вертикальной противofильтрационной завесы №2;
4. Подготовка котлована (эвакуация грунта);
5. Устройство глиняного замка;
6. Монтаж строительных конструкций (строительство модульных сооружений), а именно бетонные и арматурные работы, антикоррозионная защита бетонных конструкций, кровельные и отделочные работы и др.
7. Возведение покрывающего экрана после окончания эксплуатации модульных сооружений (заполнения модульных сооружений контейнерами с РАО в период активной эксплуатации).

## **2.1. Принципиальные особенности максимальной гидроизоляции ППЗРО с использованием инновационных конструктивных материалов с высокими прочностными и противofильтрационными свойствами**

Разрушение возводимых барьеров безопасности всех типов пунктов захоронения РАО происходит в результате проникновения поверхностных либо подземных вод к несущим и изолирующим железобетонным, металлическим конструкциям хранилищ и постепенного воздействия путем химического взаимодействия с элементами кристаллов, узлов конструкций, либо их преобразованием, с вымыванием связующих звеньев материала конструкций. Такое воздействие воды и растворенных в ней солей в течение длительного времени (сотни и тысячи лет) превращает несущие изолирующие конструкции

стен, опор, днища и кровли в сыпучую среду, состоящую из песков – природных устойчивых кремниевых и других неразлагаемых соединений.

Сооружения, находящиеся в сухом состоянии, не разрушаются во времени, чем обеспечивается долговременная безопасность ППЗРО. Поэтому в настоящей работе разрабатываются геотехнологические решения – создание новых бетонных смесей и дополнительных барьеров безопасности, направленные на изоляцию РАО от подземных и поверхностных вод и последующих процессов распространения в грунтах, для обеспечения долговременной безопасности ППЗРО.

## 2.2. Блок-схема алгоритма проведения исследований в области выбора систем и способов конструктивного исполнения ППЗРО с позиций системотехнического подхода

Алгоритм проведения исследований, последовательности проведения лабораторных испытаний, в соответствии с поставленными задачами, приведен на Рис. 2.2.

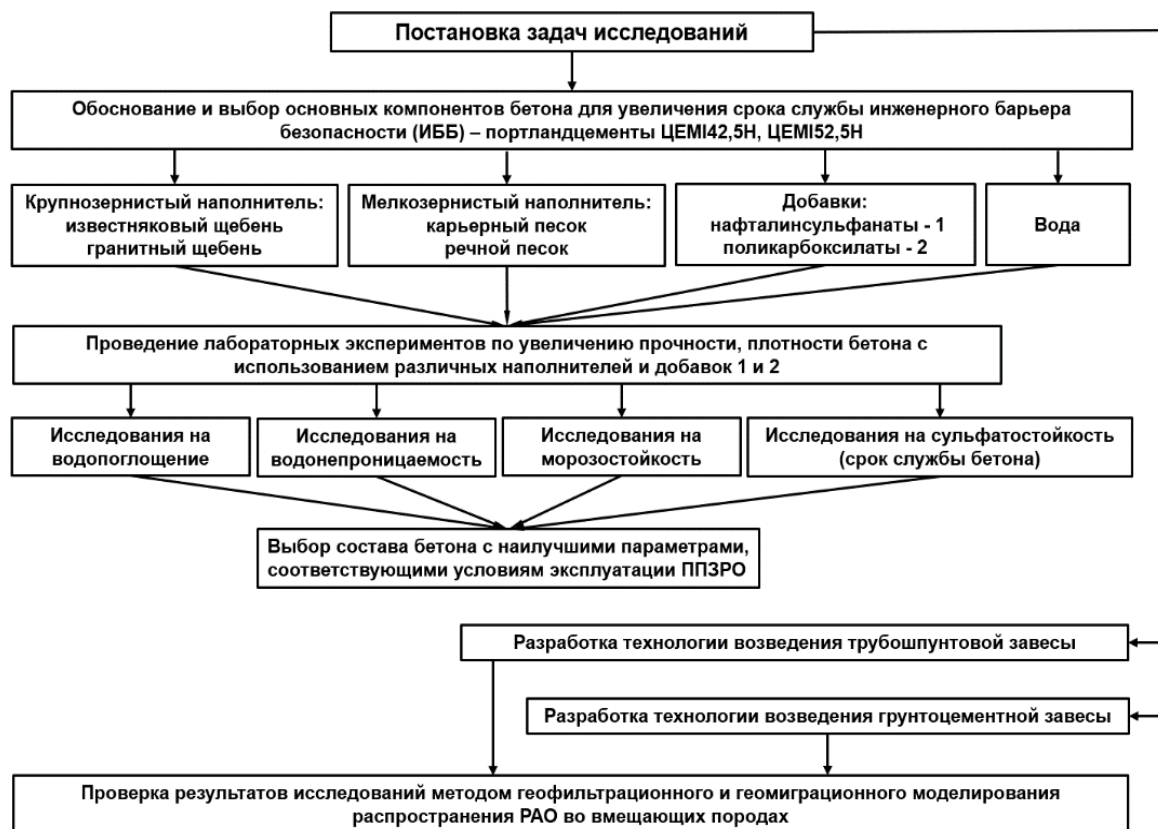


Рисунок. 2.2. – Алгоритм проведения исследований, последовательности проведения лабораторных испытаний.

Геотехнологические полимеры на основе вяжущего в виде цемента. Цемент - одно из ключевых искусственных неорганических вяжущих, применяемых при получении конструкционных бетонов (искусственного камня, геотехнологического полимера) применяемых при сооружении стен, днища и перекрытий модульных сооружений ППЗРО, а также изготовлении контейнеров, применяемых для финальной изоляции радиоактивных отходов.

Цемент делится на пять видов по наличию основного минерала в составе бетона [56]:

1. романцемент - основной минерал белит ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), применяется для изготовления бетона низких марок, строительных растворов для каменной кладки, штукатурки и т. п.;
2. портландцемент - основной минерал алит ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), нашел широкое применение в гражданском строительстве для сооружения различных типов фундаментов и изготовления железобетонных изделий и конструкций;
3. глинозёмистый - основной минерал однокальциевый алюминат ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), применяется для получения быстротвердеющих строительных и жаростойких растворов и бетонов, используемых при скоростном строительстве, аварийных работах, зимнем бетонировании, при строительстве сооружений, подвергающихся действию минерализированных вод и сернистых газов;
4. магнезиальный - основной минерал магнезита ( $\text{MgCO}_3$ ), применяется в изготовлении сухих строительных смесей, штукатурных растворов, при заливке полов в производственных помещениях, изготовлении теплоизоляторов, стекломагнезиальных листов;
5. кислотоупорный - основной минерал гидросиликата натрия ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), применяется в производстве кислотоупорных бетонов и конструкций из них, работающих в условиях кислотной агрессии.

В ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» [56] приведена классификация бетонов, получаемых на выше указанных основах цемента, представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Классификация и общие технические требования к геотехнологическим полимерам с вяжущим – цементом (бетонам) [56].

№№	Классификация геотехнологического полимера по:	Примечания
1	назначению	конструкционные; специальные.
2	стойкости к видам коррозии, эксплуатируемые в среде	без риска коррозионного воздействия (ХО); вызывающей коррозию под действием карбонизации (ХС); вызывающей коррозию под действием хлоридов (ХД и ХС); вызывающей коррозию под действием попеременного замораживания и оттаивания (ХФ); вызывающей химическую коррозию (ХА).
3	виду вяжущего	цементные; известковые; шлаковые; гипсовые; специальные.
4	виду заполнителей	плотных; пористых; специальных.
5	структуре	плотной; поризованной; ячеистой; крупнопористой.
6	условию твердения	естественные; в тепловой обработке при атмосферном давлении; в тепловой обработке при давлении выше атмосферного.
7	прочности	средней (класс прочности при сжатии $B \leq B50$ ); высоко (класс прочности при сжатии $B \geq B60$ ).
8	темпу набора прочности	быстротвердеющие; медленнотвердеющие.
9	средней плотности	особо легкие (марки менее D800); легкие (марки от D800 до D2000); тяжелые (марки более D2000 до D2500); особо тяжелые (марки более D2500).
10	морозостойкости	низкой (марки F50 и менее); средней (марки более F50 до F300); высокой (марки более F300).
11	водонепроницаемости	низкой (марки менее W4); средней (марки от W4 до W12); высокой (марки более W12).
12	истираемости	низкой (марка G1); средней (марка G2); высокой (марка G3).

Железобетонные контейнеры. Характеристики контейнеров для захоронения РАО. Все размещаемые РАО в ППЗРО приводятся к критериям приемлемости и размещаются в контейнерах в соответствии с классом РАО [53]. Перечень контейнеров и их массогабаритные характеристики представлены в Приложении А, таблице 1.

Контейнеры разделяются на три типа:

- железобетонные (НЗК-150-1,5П, НЗК-РАДОН, НЗК-МР1 и др.);
- металлические (КРАД, КМЗ, бочки, фильтр контейнер);
- текстильные (биг-бэг).

Применение различных контейнеров обусловлено назначением по классу РАО. Расположение контейнеров с РАО в ППЗРО рассчитывается в соответствии с критериями приемлемости, для обеспечения эксплуатационной и долговременной безопасности [53]. В связи с этим возникает вопрос эффективного заполнения пространства модульного сооружения, эргономичное расположение контейнеров для распределения вертикальной нагрузки и обеспечения долговременной сохранности контейнеров. Контейнеры являются первым барьером безопасности и в соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 51824-2001 «Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона» [49] служат до начала разрушения не менее 300 лет в условиях захоронения в ППЗРО.

Требования к контейнерам РАО. В соответствии НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» материалы, применяемые при изготовлении контейнеров, должны обладать [53]:

- механической прочностью (на сжатие, растяжение, изгиб);
- морозостойкостью (циклы замораживания и оттаивания);
- радиационной стойкостью (к активности размещенных РАО);
- коррозионной стойкостью (к комплексобразующим веществам и свободным жидкостям);
- стойкостью к тепловым нагрузкам (тепловыделение упаковки РАО);
- устойчивостью к термическим циклам, условиям захоронения РАО в ППЗРО.



Задачей контейнеров, заполненных РАО, является обеспечение безопасной эксплуатации при транспортировке, всех технологических манипуляциях, до этапа размещения их на длительное хранение и последующее захоронение в ППЗРО. Конструкция контейнера обеспечивает целостность при различных нестационарных (аварийных) сценариях эксплуатации. Конструкционные материалы, из которых изготовлен контейнер, обладают высокими физико-механическими характеристиками, обеспечивающими длительную работоспособность и сохранность в условиях ППЗРО (проектный период хранения), для исключения распространения радионуклидов в окружающей среде и выполнения функции барьера безопасности на период срока службы контейнера.

Функции контейнера для РАО [53]:

- транспортировочная (транспортировка контейнера с РАО от источника производства РАО до ППЗРО, транспортировка по территории ППЗРО, перемещение в модульных сооружениях при размещении на хранение и захоронение, манипуляции по извлечению контейнеров с РАО из модульного сооружения ППЗРО (нестационарная ситуация или конец периода хранения), размещения контейнера с РАО в транспортировочный контейнер;
- защитная (барьер безопасности (сдерживание миграции радионуклидов);
- конструкционная (возможность размещения дополнительных контейнеров с РАО блочным или башенным способом складирования).

Контейнеры должны быть унифицированы по типу и размеру. Контейнеры и упаковки РАО, предназначенные для длительного хранения и (или) захоронения, подлежат обязательной сертификации.

В ППЗРО 3 и 4 классов поступают на захоронение невозвратные железобетонные контейнеры различных видов: НЗК-150-1,5П; НЗК-МР; ЖЗК-1, ЖЗК-2, ЖБУ. Каждый тип контейнера имеет сертификат соответствия, в котором определены основные требования, обеспечивающие безопасность их хранения, транспортировки и захоронения (сохранность, герметичность, механическая прочность и пр.). Контейнеры не идентичны по составу бетона, вследствие чего деградационные процессы, протекающие в бетоне, и долговечность контейнеров

различны. Общие критерии приемлемости для упаковок РАО 3 и 4 класса, определяющие различные требования, в том числе по долговечности, представлены в Приложении А, таблицы 2, 3 [45].

В соответствии с НП-093-14 [53] для контейнеров типа НЗК принят консервативный срок сохранения целостности упаковки для РАО 3 класса не менее 100 лет. Согласно ГОСТ Р 51824-2001 [49], в условиях захоронения в ППЗРО сохранность контейнера должна быть обеспечена в течение 300 лет. Контейнер НЗК является ответственным элементом системы локализации радиоактивных отходов и должен играть ключевую роль в локализации радионуклидов при захоронении в течение длительного времени, сопоставимом со сроками сохранения отходов потенциальной опасности.

Для сохранения контейнерами НЗК гарантированной долговечности, при изготовлении НЗК следует применять конструкционные материалы, механические и физико-химические свойства которых отвечают следующим требованиям [49]:

- радиационной и химической стойкости;
- механической прочности;
- коррозионной стойкости по отношению к загружаемым отходам, атмосферным газам, подземным водам и дезактивирующим растворам;
- морозостойкости;
- физической и химической совместимости друг с другом, и с радиоактивными отходами, которые помещены в невозвратный контейнер;
- водонепроницаемости и водостойкости;
- газопроницаемости (для железобетонных контейнеров);
- низкой диффузионной проницаемости;
- стойкости к микроорганизмам, плесени и грибкам;
- пожароустойчивости;
- дезактивируемости.

Конструкции невозвратных защитных контейнеров должны отвечать следующим требованиям:

- 1) ограничение массогабаритных характеристик с учетом используемых

транспортных и грузоподъемных средств;

2) ограничение мощности дозы на поверхности и на расстоянии 1 м от поверхности контейнера;

3) ограничение радиоактивного содержимого в отдельном контейнере;

4) ограничение выхода радионуклидов из контейнера при хранении и захоронении (контейнер с радиоактивными отходами на стадиях хранения, транспортирования и захоронения (до фазы консервации) должен являться закрытым источником);

5) устойчивость к внешним воздействиям:

- температурным циклам (климатическим и технологическим);
- сейсмическим нагрузкам;
- пожарным нагрузкам;
- дезактивирующим растворам;

6) устойчивость к механическим нагрузкам, возникающим при нормальных условиях обращения (при размещении отходов, увеличивающихся в объеме или выделяющих газы необходимы специальные технические решения по конструкции контейнера);

7) химическая совместимость с размещаемыми РАО (при наличии в отходах коррозионно-опасных по отношению к конструкционному материалу веществ, требуется проводить специальные мероприятия по защите внутренней поверхности конструкции контейнера от коррозии);

8) сохранение надежности и долговечности при осуществлении транспортно-технологических операций, хранении и захоронении.

9) применение соответствующих конструкционных материалов гарантирует соблюдение основных требований к НЗК, данные представлены в таблице 2.2 [57, 58].

Таблица 2.2. Основные требования к НЗК [57, 58].

Требования к НЗК	Содержание требований
1	2
Требования к сроку службы	Срок службы контейнера для условий временного хранения в инженерных сооружениях должен составлять не менее 50 лет. Срок службы контейнера при захоронении должен составлять не менее 300 лет
Требования к герметичности и изолирующим свойствам	Диффузия радионуклидов через стенки контейнера не должна приводить к загрязнению воздуха и подземных вод выше установленных норм при хранении и захоронении.
Требования к стойкости внешним воздействиям	Контейнер должен выдерживать температурное воздействие окружающей среды от 203 до 343° К (от минус 50 до плюс 70°С) и повышение температуры до 130°С при сливе битумного компаунда или солевого плава непосредственно в контейнер. Контейнер должен сохранять свои свойства после прохождения землетрясения интенсивностью до проектного уровня землетрясения.
Требования к сохранению защитных свойств	Контейнер должен сохранять защитные свойства таким образом, чтобы после проведения испытаний на способность выдерживать нормальные условия обращения увеличение максимального уровня излучения на любой внешней поверхности упаковки не превышало 20% от рассчитанного.
Требования радиационной безопасности	Мощность эквивалентной дозы на его поверхности не должна превышать 2,0 мЗв/ч, а на расстоянии 1 м - 0,1 мЗв/ч. Допускается отступление значения мощности дозы на наружной поверхности контейнера при условии непревышения квоты предела годовой дозы, выделенной на внешнее облучение персонала при обращении с упаковкой.
Требования к механической прочности	Конструкция контейнеров должна выдерживать: а) статическую нагрузку на сжатие при штабелировании; б) динамическую нагрузку, возникающую при падении контейнера с отходами на жесткое основание с высоты 0,5 м на днище и на угол между днищем и стенкой; в) внутреннее давление, возникающее в результате газообразования за счет радиолиза, коррозии и разложения органических веществ.

## Продолжение таблицы 2.2

1	2
Требования технологичности при разработке и изготовлении	Конструкция контейнера должна учитывать технологический процесс переработки РАО, объем, свойства и форму загружаемых РАО и предусматривать возможность размещения РАО в стандартных первичных упаковках.
Конструктивные требования	В конструкции корпуса должны быть предусмотрены грузозахватные элементы, обеспечивающие возможность механизированного дистанционного подъема для перемещения корпуса крышки и упаковки в целом.

Марка бетона по морозостойкости F 150, принятая по СП 63.13330.2012 [50], гарантирует сохранение его прочности при 150 циклах попеременного замораживания и оттаивания при стандартных условиях определения, которые характерны для температурных режимов большинства районов размещения ППЗРО (средняя зимняя температура около минус 15 °С) [57].

В таблице 2.3 представлены результаты расчетов, экспериментов и сертификационных испытаний, подтверждающие соблюдение требований к контейнерам НЗК [57].

Таблица 2.3. Основные показатели контейнеров НЗК [57].

Требование к НЗК	Определяющий параметр	Результаты расчетов, экспериментов или сертификационных испытаний
1	2	3
Долговечность при хранении в течение 50 лет	Глубина карбонизации бетона не более 30 мм Марка бетона по морозостойкости не менее F 150	Расчетное значение карбонизации 6-13 мм Экспериментальное определение морозостойкости более F 400
Долговечность при захоронении в течение 300 лет	Водонепроницаемость бетона не менее W 6	Экспериментальное определение водонепроницаемости бетона более W 14

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
Изолирующие свойства	Коэффициент диффузии цезия не более $3 \times 10^{-13}$ м <sup>2</sup> /с	Экспериментальное определение коэффициента диффузии цезия $2,4 \times 10^{-14}$ м <sup>2</sup> /с
Радиационная безопасность (для цементированных и битумированных РАО)	Мощность дозы: на поверхности НЗК $\leq 2$ мЗв/ч; на расстоянии 1 м $\leq 0,1$ мЗв/ч	Расчетная мощность дозы на поверхности НЗК - 0,28 мЗв/ч; на расстоянии 1 м - 0,05 мЗв/ч
Механическая прочность: - при установке в штабель в 8 рядов - при падении с высоты 0,5 и 1,2 м	- допустимое напряжение $\leq 280$ кг/см <sup>2</sup> - сохранение герметичности	- расчетное напряжение 12,25 кг/см <sup>2</sup> - расчетное отсутствие трещинообразования - расчетное отсутствие трещинообразования

В соответствии с требованиями к контейнерам НЗК, характеристики водонепроницаемости и изолирующих свойств стенок контейнеров должны обеспечить выход активности по радионуклиду цезию Cs-137 с активностью в жидкой фазе не более уровня вмешательства (УВ) [57].

Для оценки диффузионной проницаемости контейнера НЗК выполнены расчеты на основании нестационарного переноса радионуклида в двуслойной среде. Проведенные расчеты показали, что при захоронении контейнеров в грунт бетон должен иметь коэффициент диффузии  $D_{эфф}$  не более  $3 \times 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с. В этом случае концентрация Cs-137 в воде у наружной стенки НЗК никогда не достигнет концентрации уровня вмешательства (УВ) [57].

Требования к фильтрационным параметрам контейнера НЗК определялись из условия минимальной допустимой скорости фильтрации через стенки контейнера, при которой концентрация цезия Cs-137 в подземных водах не превысит УВ. Расчет определена допустимая скорость фильтрации в стенке контейнера, равная 0,0002 м/год. Это соответствует рассчитанному коэффициенту фильтрации  $K_f = 0,0003$  м/год или  $K_f = 9,5 \cdot 10^{-10}$  см/с. Бетон с таким коэффициентом фильтрации по ГОСТ 12730.5-84 [59] соответствует марке по водонепроницаемости W6.



Анализ приемлемости высокопрочных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Одна из первых задач работы состояла в поиске, разработке универсального материала для изготовления контейнеров, пеналов и упаковок для РАО всех классов, от тепловыделяющих РАО 1 и 2 классов до 3 и 4 классов. Безопасное и длительное хранение радиоактивных материалов - главная задача всех видов контейнеров, для защиты и транспортировки радиоактивных отходов, включая радиоизотопные источники тепла (РИТ, рис. 2.3). Первыми были рассмотрены созданные имеющиеся высокопрочные контейнеры для защиты радиоактивных источников тепла (РИТ), с целью возможного использования для изоляции РАО в ППЗРО. Группа высокоактивных РАО 1 и 2 класса характеризуются выделением тепла при хранении, поэтому теплоизоляционные высокопрочные контейнеры для данных классов РАО могут быть востребованы. В работе проведен анализ возможности их использования для создания контейнеров для изоляции РАО 3 и 4 классов.



Рисунок 2.3 - Защитный контейнер из углерод-углеродного композиционного материала УУКМ [60-67].

Для защиты изотопов в составе РИТ применяют объёмно армированные углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). УУКМ представляют собой материал, состоящий из двух компонентов: матрицы и ее наполнителя - армирования, состоящего из графитового или углеродного волокна. Матрицы, применяющиеся в производстве УУКМ обладают свойствами волокнистых композиционных материалов (КМ) и свойствами различных видов графита. УУКМ обладают стойкостью к радиации, ядерному, электромагнитному излучению, высокими механическими (прочностными и жесткостными) характеристиками, как при нормальных, так и при высоких температурах (таблица 2.4).

Одним из важных качеств УУКМ является длительная работоспособность в окислительной среде при температурах до 500 °С., прочность повышается почти в 2 раза с ростом температуры. Изделия из УУКМ могут применяться в условиях со значительными перепадами температур. Каркас из углеродного волокна, являющийся армирующим наполнителем, позволяет увеличить прочность в разы и исключить появления трещин из-за внутренних напряжений.

Таблица 2.4. Физико-механические характеристики материала УУКМ [60-67].

№	Характеристика	Ед. изм.	4D	3D
1	2	3	4	5
1	Плотность (теоретическая)	кг/м <sup>3</sup>	1930-1940	
2	Предел прочности на сжатие	МПа	165	182
3	Предел прочности на растяжение	МПа	134	137
4	Модуль упругости	ГПа	57	52
5	Коэффициент линейного термического расширения	10 <sup>-6</sup> °С <sup>-1</sup>	3,11	3,11
6	Коэффициент теплопроводности	Вт/м·К	60	49,2
7	Температура плавления	°С	3300	
8	Газопроницаемость	см <sup>3</sup> /с	0,57	0,55
9	Поверхностное электрическое сопротивление	мкОм·м	21,4	20
10	Скорость реакции окисления	г/г·с	4,16	6,01
11	Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /г	0,61	0,57
Рентгенографические характеристики углеродного волокна				
12	Межплоскостное расстояние (d <sub>002</sub> )	нм	0,347	0,348
13	Степень графитации (g)	%	-	-

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
14	Размер кристаллитов (Lc)	нм	6,0	6,0
15	Размер кристаллитов (La)	нм	-	-
Рентгенографические характеристики углеродной матрицы				
16	Межплоскостное расстояние ( $d_{002}$ )	нм	0,339	0,34
17	Степень графитации (g)	%	64	44
18	Размер кристаллитов (Lc)	нм	36	29
19	Размер кристаллитов (La)	нм	26	16

Основными армирующими волокнистыми материалами в КМ применяют стеклянные, борные, углеродные и арамидные волокна, нити, жгуты и пряжу. В качестве материала для матриц служат эпоксидные, фенольные, фурановые и другие смолы, а также каменноугольный пек (продукт крекинга угля).

Анализ свойств материалов УУКМ позволил сделать следующие выводы: для изоляции радиоактивных отходов 3 и 4 классов в условиях ППЗРО не требуется применение материалов, работающих при высоких температурах. Также материалы УУКМ не удовлетворяют требованиям:

- материалы, применяемые для изготовления контейнеров РАО, должны обладать минимальной пористостью, для обеспечения низкого капиллярного эффекта при взаимодействии с жидкостями;
- срок службы материала контейнеров РАО должен быть не менее 300 лет (условия активного хранения РАО в ППЗРО). Структурно УУКМ - пористый материал, срок его службы по данным ускоренных климатических испытаний - не более 25-35 лет, что не удовлетворяет требованиям долговременной эксплуатации [55].

Анализ приемлемости серобетона в качестве изолирующего материала. В качестве альтернативного варианта захоронения РАО рассмотрено также размещение контейнеров с РАО в отработанных камерах подземных рудников (подземных урановых рудников). Горные работы ведутся на глубинах от 300 до 700м, размеры очистных камер позволяют их использовать для захоронения контейнеров с РАО. Имеется много аргументов в пользу этого варианта, сдерживающим фактором является большая обводненность рудников, опасность

выноса несорбируемых РАО на поверхность. Данный вопрос требует тщательного изучения, особенно в плане исследования гидрогеологии, трещиноватости, фильтрационных свойств пород [68].

Материалы на основе серы могут служить надежным изолирующим материалом при строительстве ППЗРО в силу свойства гомогенности серы, обволакивающей наполнители и препятствующие проникновению воды или других жидкостей. Сложность использования серобетона заключается в потере прочности серы при повышении температуры, она может истечь с места размещения, оставив фильтрующим каркас из наполнителей. Технология приготовления серобетона также сложная ввиду того, что диапазон температур, в котором сера находится в жидком фазовом состоянии, небольшой.

Таблица 2.5. Физико-механические характеристики серобетона [69-73].

№	Характеристика	Ед. изм.	
1	2	3	4
1	Плотность (теоретическая)	кг/м <sup>3</sup>	2400
2	Предел прочности на сжатие	МПа	62,0
3	Предел прочности на растяжение	МПа	7,4
4	Модуль упругости	ГПа	3 – 4 x 10 <sup>4</sup>
5	Коэффициент линейного термического расширения	10 <sup>-6</sup> с	8,3 x 10 <sup>-6</sup>
6	Время набора прочности 100%	ч	3
7	Истираемость	%	3
8	Количество связующего,	кг/м <sup>3</sup>	297
9	Влагостойкость	Ед.	1,0
10	Химическая стойкость (к кислотам)	%	84
11	Морозостойкость (при 100% влажности)	ч	300

Дальнейший поиск эффективных материалов велся в направлении подбора активных добавок к существующим портландцементам, обеспечивающих получение высокопрочных и плотных бетонов, способных противостоять разрушающим воздействиям со стороны солей, содержащихся в грунтовых водах. Поиск проводился в направлении применения соединений, содержащих активные элементы, способные вызвать замещения в молекулярных структурах цементов в

процессе приготовления бетонов. Как правило, это материалы, содержащие хлор, щелочи и другие подобные соединения.

### **2.3. Функциональная структура ППЗРО**

Конструктивными элементами ППЗРО, выполненными на основе геотехнологического полимера с цементом, являются: ограждающие конструкции (стены, перегородки), фундаментная плита, верхнее перекрытие.

Основное назначение конструктивных элементов ППЗРО - обеспечение механической прочности и предотвращение поступления воды в ППЗРО на время эксплуатации и в период после закрытия.

Механическая прочность обеспечивается включением в бетон стальной арматуры, которая существенно повышает несущую способность бетонных конструкций. Прочность на растяжение железобетонной балки по сравнению с бетонной (неармированной) балкой возрастает в 15-20 раз. Гидроизолирующие свойства ЖБК обеспечиваются применением марок бетонов с низкой водопроницаемостью. Специальные виды бетонов, применяемые в контейнерах НЗК, обладают, помимо прочностных и гидроизоляционных свойств, высокими сорбционными свойствами по отношению к радионуклидам.

Железобетон получил широкое распространение в строительстве вследствие многих его положительных свойств: долговечности, огнестойкости, стойкости против атмосферных воздействий, высокой сопротивляемости статическим и динамическим нагрузкам.

*Контролируемые характеристики геотехнологического полимера с вяжущим-цементом (бетона).* Контролируемыми характеристиками бетонов, которые определяют возможность применения в заданных условиях эксплуатации являются: структурные (плотность) и физико-механические (прочность на сжатие и растяжение), фильтрационные (водопроницаемость, морозостойкость, содержание связанной воды) [74].

В соответствии с ГОСТ 25192-2012 определяются классы бетонов по прочностным характеристикам [56]:

- прочности на сжатие (B3,5 - B80);
- прочности на осевое растяжение ( $B_t$  0,4 -  $B_t$  4,0);
- прочности на растяжение при изгибе ( $B_{tb}$  0,4 -  $B_{tb}$  8,0);
- морозостойкости (F50 - F1000) – бетоны и конструкции из них, эксплуатируемые в условиях циклического замораживания и оттаивания;
- водонепроницаемости (W2 - W20) – бетоны и конструкции из них, эксплуатируемые в нестандартных условиях, повышенной влажности и агрессивных условиях (условия, способствующие повышенной коррозии).

Также по ГОСТ 26633-2015 (переиздан 02.2019) определяется соответствие прочности бетона по маркам [75]:

- прочности на сжатие (M50 – M1000);
- прочности на осевое растяжение ( $P_t$  5 -  $P_t$  50);
- прочности на растяжение при изгибе ( $P_{tb}$  5 -  $P_{tb}$  100).

Требования к применяемым классам бетона по вышеуказанным характеристикам отражаются, как правило, в проектной документации, иные дополнительные требования представлены в ГОСТ 4.212-80.

Требования к заполнителю бетона отражены в:

- ГОСТ 8267-93 (щебень и гравий из плотных горных пород) [76];
- ГОСТ 8269.1-97 (щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства) [77];
- ГОСТ 26644-85 [78], ГОСТ 32495-2013 (щебень из шлаков) для тяжелых и особо тяжелых бетонов [79];
- ГОСТ 8736-2014 (песок для строительных работ) [80];
- ГОСТ 5578-94 (щебень и песок из шлаков) [81];
- ГОСТ 25592-91 (смеси золошлаковые) для особо легких, легких бетонов [82].

Также к контролируемым характеристикам бетона с их количественными показателями (% по массе) в соответствии с ГОСТ 26633-2015 [75] относятся различные примеси, негативно влияющие на физико-механические характеристики (прочности, долговечности, внутренней коррозии, коррозии конструкционного



наполнителя – арматуры, качества поверхности) бетона в ходе его эксплуатации, а именно:

- аморфные разновидности диоксида кремния;
- сульфаты;
- слоистые силикаты;
- магнетит, гидроксиды железа;
- апатит, нефелин, фосфорит, галоиды;
- цеолиты;
- уголь, графит.

Примеси, вызывающие внутреннюю коррозию бетона:

- аморфные разновидности диоксида кремния;
- сульфаты и сульфиды;
- хлориты и цеолиты;
- магнетит, гидроксиды железа.

Примеси, вызывающие коррозию конструкционного наполнителя – арматуры:

- сульфиды и сульфаты;
- галоиды;
- водорастворимые хлориды.

Для полноценной эксплуатации бетона контролированию подлежат условия эксплуатации, а именно, агрессивность среды и влияние климатических факторов. Нормы степени агрессивного воздействия среды представлены в СП 28.13330.2017, их можно разделить [83]:

- физическое состояние среды - на газовые (химический состав газов, концентрации), жидкие (вода, жидкие углеводороды и пр.) и твердые;
- интенсивность воздействия (концентрации растворенных веществ);
- характер воздействия среды (химический (кислотная, щелочная и др.), биологически активный (бактерии и тд.), физико-механический (корни, водоросли тд.), температурный (замораживание и оттаивание)).

Нормы климатических факторов представлены в СП 63.13330.2012 [50], СП 131.13330.2018 [84] влияющие на коррозию бетона.

При соблюдении всех вышеизложенных ГОСТ, СП обеспечивается эффективная эксплуатация бетона и конструкционного наполнителя в модульных сооружениях ППЗРО.

#### **2.4. Проектные параметры и характеристики материалов, обеспечивающих долговременную сохранность конструктивных элементов ППЗРО с оценкой их эксплуатационной устойчивости**

Длительность службы бетонных сооружений зависит от большого числа факторов, ключевыми являются механические характеристики (сжатие, растяжение, изгиб [85-93]) и физические (водонепроницаемость, водопоглощение, морозостойкость [85-89, 94-103]), позволяющие оценить долговечность конструктивных элементов или сооружения в целом, а также обеспечить безопасность сооружения в течение всего периода эксплуатации [104-106].

Из материалов, представленных в [49,107] первый инженерный барьер безопасности (ИББ1) - железобетонный контейнер, предназначенный для условий захоронения среднеактивных отходов 3 и 4 классов в приповерхностных или подземных пунктах финальной изоляции радиоактивных отходов. Он должен сохранять свойства не менее 300 лет (срок потенциальной опасности большей части низко- и среднеактивных отходов).

Требования, предъявляемые к бетону ИББ1 [107]: наличие класса бетона не ниже В40, показателя водонепроницаемости не ниже W10, морозостойкости не ниже F10, диффузионной проницаемости (для цезия  $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , трития  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ) и воздухопроницаемости не более  $0,0726 \text{ см}^3/\text{с}$ .

По Р.М. Гатауллину и др. [107] срок службы ИББ1 (захоронение в приповерхностных могильниках, породы слабопроницаемые, скальные и осадочные – глина, суглинок, известняки, температура положительная) составляет от 250 до 300 лет.

Одной из целей настоящего исследования является разработка бетонов, обеспечивающих повышение физико-механических характеристик, для потенциального увеличения срока службы барьеров безопасности, свыше 300 лет.

Исследования свойств и разработка составов бетонов проведены на лабораторно-исследовательской базе ООО «Евросинтез» (с участием Тимергалиева Н.А., Малинина А.С., Галактионовой Е.В., Токаревой М.Ю.), на образцах бетонов на основе двух видов цемента: быстротвердеющего портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ I 52,5Н, при добавлении суперпластифицирующих добавок нафталинсульфатной и поликарбоксилатной природы. В качестве мелкозернистого наполнителя использованы песок карьерный и песок речной, в качестве крупнозернистого наполнителя использованы щебень известняковый и щебень гранитный (рис. 2.4, таблица 1 приложение Б).

Составы бетонов следующие.

В качестве вяжущего использованы:

1. Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, ГОСТ 31108-2020 [108] производства Воронежского филиала АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» со следующими техническими характеристиками:

- класс прочности – 42,5;
- активность после пропаривания – 38,9 МПа;
- нормальная густота цементного теста – 29,25%;
- начало схватывания – 175 мин.;
- конец схватывания – 255 мин.;
- среднее значение активности за предшествующие 3 месяца – 58 МПа.

2. Портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н ГОСТ 31108-2020 [108] производства Воронежского филиала АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» со следующими техническими характеристиками:

- класс прочности – 52,5;
- активность после пропаривания – 43,5 МПа;
- нормальная густота цементного теста – 26,20%;
- начало схватывания – 150 мин.;

- конец схватывания – 255 мин.;
- среднее значение активности за предшествующие 3 месяца – 55,8 МПа.

В качестве мелкозернистого наполнителя использованы:

1. Песок карьерный среднесеяный (Мк 2,3) ГОСТ 8736-2014 [80] производства ООО «Элиос» (карьер МВК д. Николаевка, Александровский район, Владимирская область) со следующими техническими характеристиками:

- содержание пылеватых и глинистых частиц – 1,3%;
- содержание зерен крупностью свыше 10 мм – 1,85%;
- содержание зерен крупностью свыше 5 мм – 3,5%;
- насыпная плотность – 1,55 т/м<sup>3</sup>;
- модуль крупности (Мк) – 2,31;
- влажность – 4,7%;
- удельная эффективная активность естественных радионуклидов – 20,8+/-9,6 Бк/кг.

2. Песок речной, Мк 1,6 ГОСТ 8736-2014 [80] производства ООО «Восток Дон», (высохшее русло реки-карьер Суходольск, п. Суходольск Азовский район, Ростовская область):

- содержание пылеватых и глинистых частиц – 1,13%;
- содержание зерен крупностью свыше 10 мм – 0%;
- содержание зерен крупностью свыше 5 мм – 0,14%;
- содержание зерен крупностью менее 0,16 мм – 5,57%;
- насыпная плотность – 1,46 т/м<sup>3</sup>;
- модуль крупности (Мк) – 1,56;
- влажность – 12,1%.

В качестве крупнозернистого наполнителя использованы:

1. Щебень известняковый (смесь фракция 5-20 мм), ГОСТ 8267-93 [76] производства ИП Рыков П.В. (карьер с. Ивантеевка, Ивантеевский район, Саратовская область), со следующими техническими характеристиками:

- зерновой состав щебня, d - 97,2%, 0,5(d+D) – 79,2%, D - 6,8%;
- содержание пылеватых и глинистых частиц – 2,4%;
- содержание зерен слабых пород – 7,5%;

- насыпная плотность- 1,28 т/м<sup>3</sup>;
- морозостойкость щебня – F50;
- марка щебня по прочности (дробимости) – 600;
- истираемость – И-1;
- удельная эффективная активность естественных радионуклидов – 37 Бк/кг.

2. Щебень гранитный (смесь, фракция 5-20 мм), ГОСТ 8267-93 [76] производства ООО «Сортовальский дробильно-сортировочный завод» (месторождение гранитов «Кириявалахти», п. Кириявалахти, г. Сортавал, Республика Карелия) со следующими техническими характеристиками:

- зерновой состав щебня, d – 95,6%, 0,5(d+D) – 57,0%, D – 9,7%;
- содержание пылеватых и глинистых частиц – 1,4%;
- содержание зерен слабых пород – 0%;
- насыпная плотность – 1,39 т/м<sup>3</sup>;
- морозостойкость щебня – F400;
- марка щебня по прочности (дробимости) – 1400;
- истираемость – И-1;
- удельная эффективная активность естественных радионуклидов – 242 Бк/кг.

Для решения проблемы долгосрочного захоронения РАО - получения высокопрочного бетона повышенной плотности и долговечности в диссертации использованы специальные добавки - высокомолекулярные химически активные агенты, синтезированные ООО «ЕвроСинтез». В качестве специальных добавок использованы:

1. Пластифицирующая добавка на основе модифицированных полимеров нафталинсульфанатов (далее **добавка 1**), ГОСТ 24211-2008 [109], производства ООО «ЕвроСинтез», со следующими техническими характеристиками (концентрация раствора 40 %):

- pH – 6±2;
- плотность – 1,15±0,03 г/см<sup>3</sup>;
- содержание хлорида – <0,1 (EN 480-10) %;
- содержание щелочи – <01 (EN 480-12) %;

- удельная эффективность естественных радионуклидов – не более 370 Бк/кг;
- сухой остаток  $40 \pm 2\%$ ;
- внешний вид: однородная жидкость коричневого цвета.

2. Высокоэффективный суперпластификатор на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров (далее **добавка 2**), ГОСТ 24211-2008 [109], производства ООО «ЕвроСинтез» со следующими техническими характеристиками (концентрация раствора 40,7%):

- pH –  $6 \pm 2$ ;
- плотность –  $1,04 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>;
- содержание хлорида –  $< 0,1$  (EN 480-10) %;
- содержание щелочи –  $< 0,1$  (EN 480-12) %;
- сухой остаток  $40 \pm 2\%$ ;
- внешний вид: однородная жидкость светло-жёлтого цвета;
- удельная эффективность естественных радионуклидов – не более 370 Бк/кг.

3. Минеральная добавка (модификатор), объём введения от 1 до 10% от массы вяжущего:

- массовая доля SiO<sub>2</sub> – не менее 22%;
- массовая доля Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – не менее 19 %;
- массовая доля SO<sub>3</sub> – не менее 16%;
- насыпная плотность –  $3\,750 \pm 50$  кг/м<sup>3</sup>.

В рамках исследований разработано 16 составов бетонной смеси, состоящих из:

- 4 комбинаций компонентов (крупно - и мелкозернистых наполнителей, воды):  
РИВ - песок речной (Р), щебень известняковый (И), вода (В);  
КИВ - песок карьерный (К), щебень известняковый (И), вода (В);  
РГВ - песок речной (Р), щебень гранитный (Г), вода (В);  
КГВ - песок карьерный (К), щебень гранитный (Г), вода (В);
- портландцемента двух классов (42,5Н, 52,5Н);
- суперпластифицирующих добавок на основе нафталинсульфанатов, поликарбоксилатов.

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 2.4.

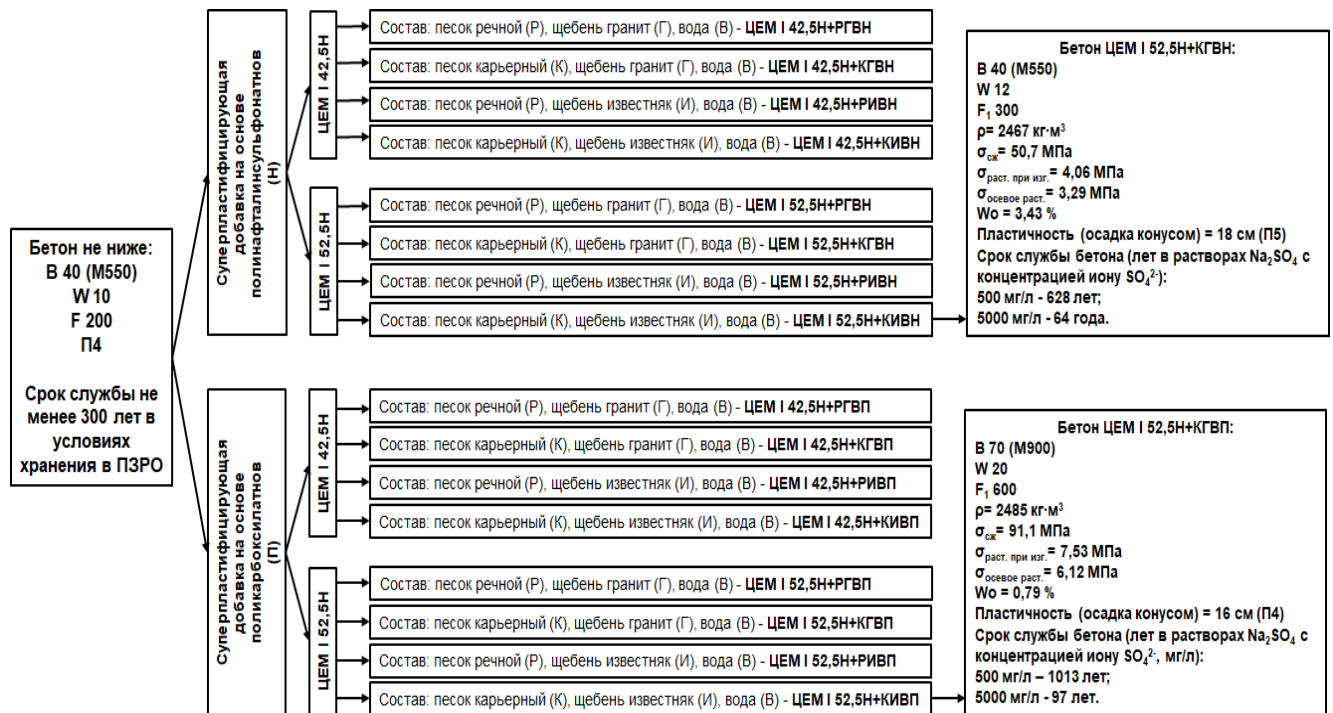


Рисунок 2.4 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по разработке и исследованию бетонов на основе двух суперпластифицирующих добавок, двух видов цемента и 4 видов наполнителей.

*Исследования прочности бетона на сжатие.* Первая серия экспериментов проведена для установления связи между прочностью и классом бетона для новых, получаемых в настоящей работе бетонных смесей. Понятие класса бетона широко используется в промышленности. Необходимую прочность бетона можно получить несколькими путями, изменяя соотношение компонентов, используя мелкие и крупные заполнители, различные добавки [85-90, 93]. Принадлежность всех ранее полученных бетонов к определенным классам закреплена, ГОСТ 25192-2012 [56].

Определение класса по прочности на сжатие новых составов бетона проведено путем лабораторных экспериментов по методике ГОСТ 10180-2012 [110] на образцах-кубах размерами 100x100x100 мм<sup>3</sup> (рис. 2.4), в промежуточном (3, 7 сутки) и проектном (28 сутки) возрасте.



В силу большого объема получаемых данных экспериментов, результаты исследований прочности бетонов на сжатие по ГОСТ 10180-2012 [110] вынесены, приведены в таблице 2 Приложение Б и представлены на рисунке 2.5.

На рисунках 2.6: а), б) и 2.6: а), б) представлены зависимости прочности на одноосное сжатие бетона от класса бетона на основе двух вяжущих ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н, полученные по результатам проведения лабораторных экспериментов.

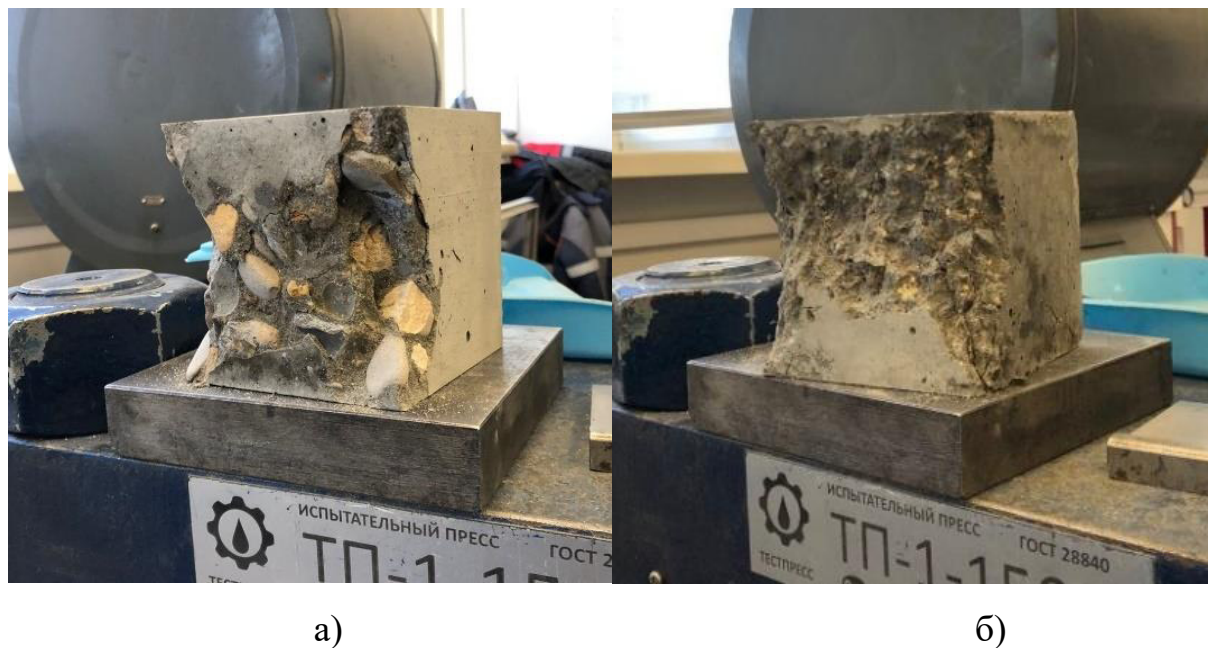
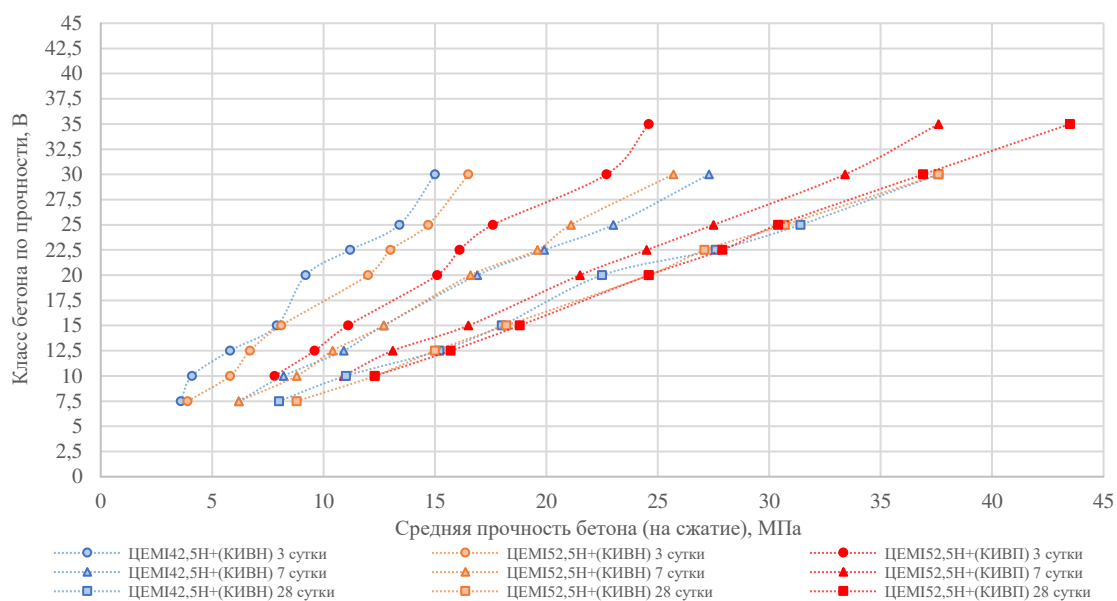


Рисунок 2.5 - Испытанные образцы на прочность (одноосное сжатие):

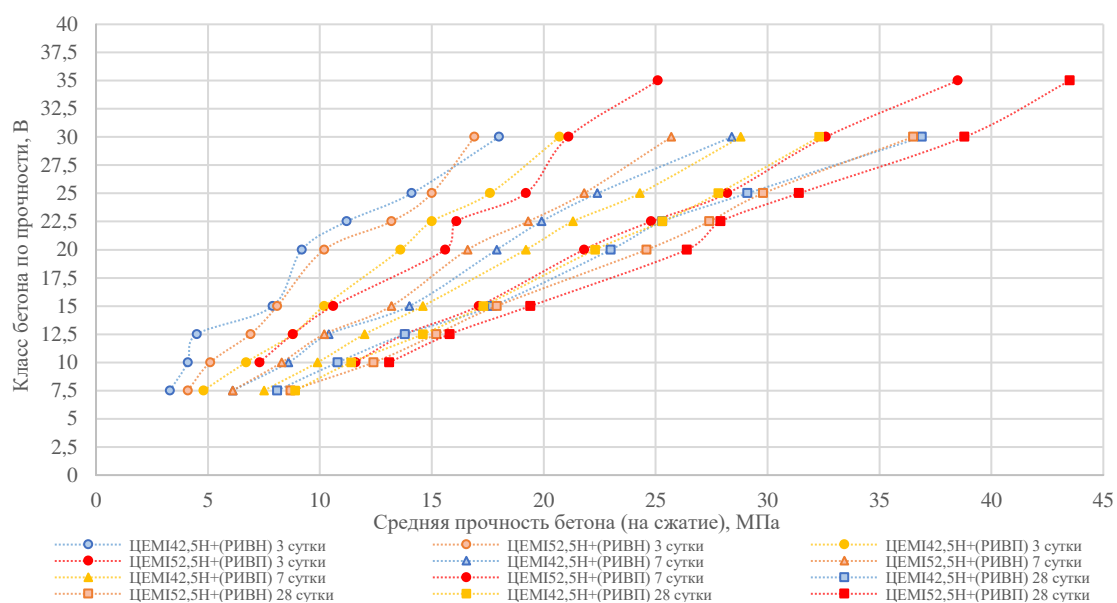
а) крупный наполнитель - щебень известняковый, б) крупный наполнитель - щебень гранитный.

На рисунках 2.6 а) и б) показан равномерный вклад компонентов бетона в процесс набора прочности исследуемых образцов бетона классов В7,5-В30. Модификация бетонной смеси с щебнем известняковым при помощи замены песка карьерного на речной, применение добавок - нафталинсульфатов и поликарбоксилатов привели к существенному увеличению темпа набора прочности двух образцов бетона с показателями прочности на сжатие 43,9 МПа (ЦЕМ I 52,5Н+(КИВП)) и 43,5 МПа (ЦЕМ I 52,5Н+(РИВП)), что соответствует классу В35. Из данных, представленных в таблице 2 Приложения Б видно, что замена карьерного песка на речной привела к увеличению прочности бетона на  $\approx 0,5-1$

МПа на 3-и сутки, по сравнению с образцами с применением карьерного песка. На 7-е сутки разница составила  $\approx 1$  МПа, на 28 сутки образцы, изготовленные с применением мытого карьерного песка, имели прочность на 1-1,5 МПа выше.



а)

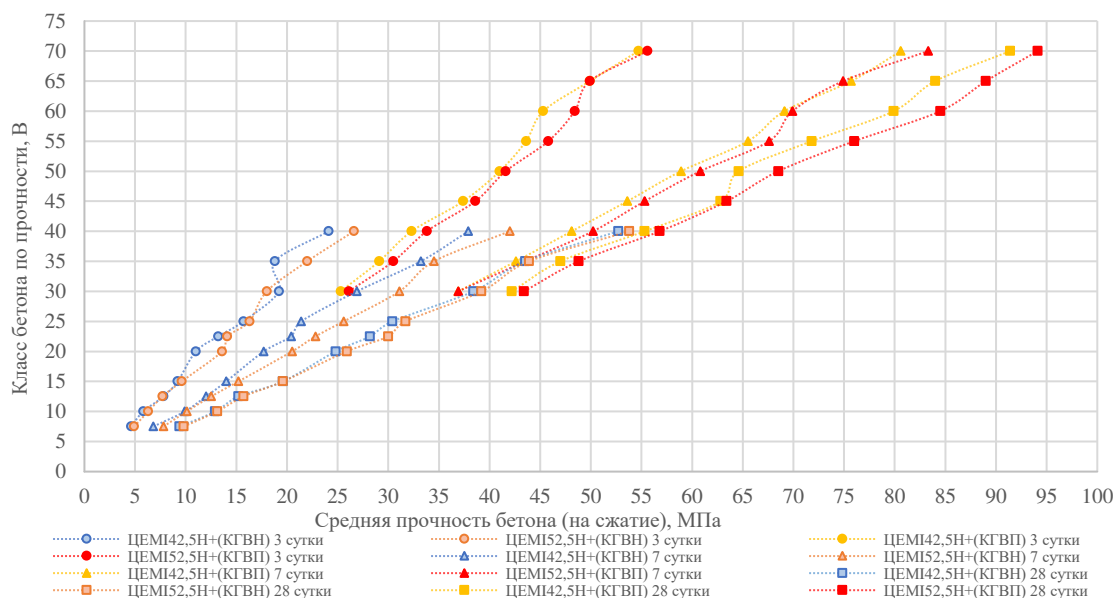


б)

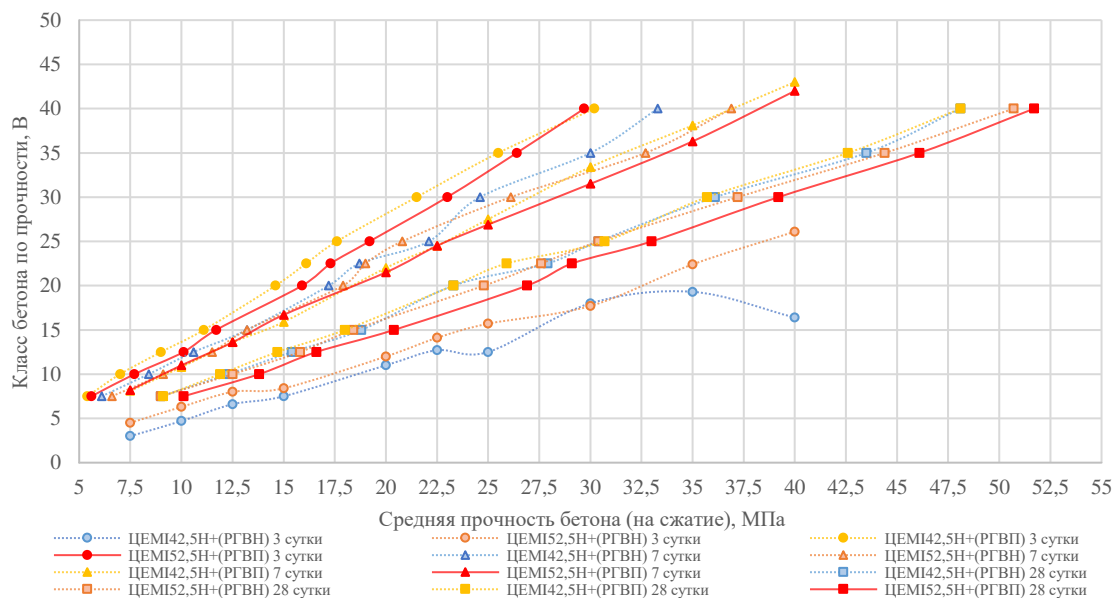
Рисунок 2.6 - Зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие бетона. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП

Зависимости, представленные на рисунках 2.7 а) и б) отражают разное течение процессов, протекающих при отверждении бетонной смеси. Так, на

рисунке 2.7 а) и из данных таблицы 2 Приложение 2, видно эффективное взаимодействие добавки 1 с вяжущим, стабилизация коллоидной системы происходит при меньших количествах жидкого наполнителя, водоцементное отношение образцов бетона классов В7,5-40 изменяется от 1 до 0,45, особенно - у образцов бетона составов ЦЕМ I 42,5Н+(КГВП), ЦЕМ I 52,5Н+(КГВП).



а)



б)

Рисунок 2.7 - Зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие бетона. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КГВН и КГВП, б) РГВН и РГВП.

Применение пластифицирующей добавки 2 позволило получить образцы бетона классов от В30 до В70 с водоцементным отношением В/Ц от ~0,5 до ~0,3. Показатели прочности в промежуточном (3, 7 сутки) и проектном (28 сутки)

возрасте демонстрируют влияние добавки 2. Прочность в среднем составляет:

- в случае ЦЕМІ42,5Н+(КГВП) на 3 сутки - 63 %, на 7 сутки - 93%, на 28 суток - 105% от средней прочности класса бетона,
- в случае ЦЕМІ52,5Н+(КГВП) - на 3 сутки - 65%, на 7 суток - 95%, на 28 суток - 109% от средней прочности класса бетона.

На рисунках 2.6 а) и 2.7 а) показан вклад крупнозернистого наполнителя при формировании прочности в образцах бетона. Из данных таблицы 2 Приложение Б, видно, что использование материалов, обладающих меньшей пористостью (гранит 0,2-4%, известняк 5,4-7,3%), меньшим водопоглощением (гранит 0,15-1,3%, известняк ~2,5%) в образцах с добавкой 1 приводит к увеличению прочности минимум на 10%, вне зависимости от применяемого вяжущего.

Замена щебня известнякового на гранитный в образцах с вяжущим ЦЕМІ42,5Н с одинаковым составом других компонентов приводит к возрастанию темпа увеличения прочности на 3 сутки: от 1 МПа до 4,2 МПа (у образцов бетона В7,5 разница прочности составляет 26%, у бетона В10 -40%, у бетона В12,5 - 36%, у бетона В15-30 - 16-28%).

Замена крупнозернистого наполнителя позволила получить два состава бетона, соответствующих марке В35 ( $\sigma_{сж}=18,8$  МПа) и В40 ( $\sigma_{сж}=24,1$  МПа). На 7 сутки разница в прочности составляет у бетона В7,5- В15 - 0,6-1,3 МПа, у бетона В25- В30 показатели прочности на сжатие практически равны, на 28 суток разница составляет 0,5-2,5 МПа у всех образцов.

Замена крупнозернистого щебня известнякового на гранитный в образцах с вяжущим ЦЕМІ52,5Н демонстрирует аналогичные показатели: на 3 сутки разница по прочности на сжатие составляет 0,5-1,6 МПа, на 7 суток - 1,3-5,4 МПа, на 28 суток - 0,6-1,5 МПа.

Замена известнякового щебня на гранитный в образцах с добавкой 2 позволила получить образцы бетона разных марок. Применение гранитного щебня

и вяжущего ЦЕМІ42,5Н позволило получить образцы бетона, соответствующие классам В30-В70 (прирост  $\sigma_{сж}$  на 3 суток у всех образцов бетона 59-66% от проектного, на 7 суток - 90-96% от проектного и на 28 суток -100-110% от проектного класса бетона).

Так как отсутствует серия образцов ЦЕМІ42,5Н+(КИВП) с известняковым щебнем, анализ разницы при смене наполнителя произвести не представляется возможным, но анализируя образцы с вяжущим ЦЕМІ52,5Н видна ярко выраженная положительная динамика, из чего делается вывод, что отличия могут быть существенные и идентичные.

Использование двух видов крупнозернистого щебня у образцов на вяжущем ЦЕМІ52,5Н открывает возможность получения всех классов бетона от В7,5 до В70. Как видно из данных таблицы 2 приложение Б, образцы с известняковым щебнем позволяют получить бетон В7,5-В35, образцы с гранитным щебнем - В30-В70. Следовательно, для анализа влияния смены наполнителя могут быть привлечены два образца бетона В30 и В35, так как присутствуют у обоих наполнителей.

В проводимых экспериментах, на 3 суток у образца бетона В30 разница  $\sigma_{сж}$  от применения известнякового и гранитного щебня составляет 27,3 МПа (на 120% больше, чем у бетона В30 на известняковом щебне), на 7 суток увеличение  $\sigma_{сж}$  - до 41,5 МПа (124%), на 28 суток - 52,2 МПа (142%). У бетона В35 разница  $\sigma_{сж}$  на 3 суток - 30,9 МПа (125%), на 7 суток - 45,7 МПа (121%), на 28 суток - 50,6 МПа (116%).

Причиной такой разницы в прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) является особенность 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 Рис. 2.8 представлены зависимости класса бетона от прочности на 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 Рис. 2.8 и таблицы 2 Приложения Б, стабилизация

коллоидной системы с применением добавки 1 позволяет получить максимальную прочность образцов 55,8 МПа, что соответствует классу бетона В40. Применение добавки 2 позволяет получить максимальную прочность образцов 94,1 МПа что соответствует классу бетона В70.

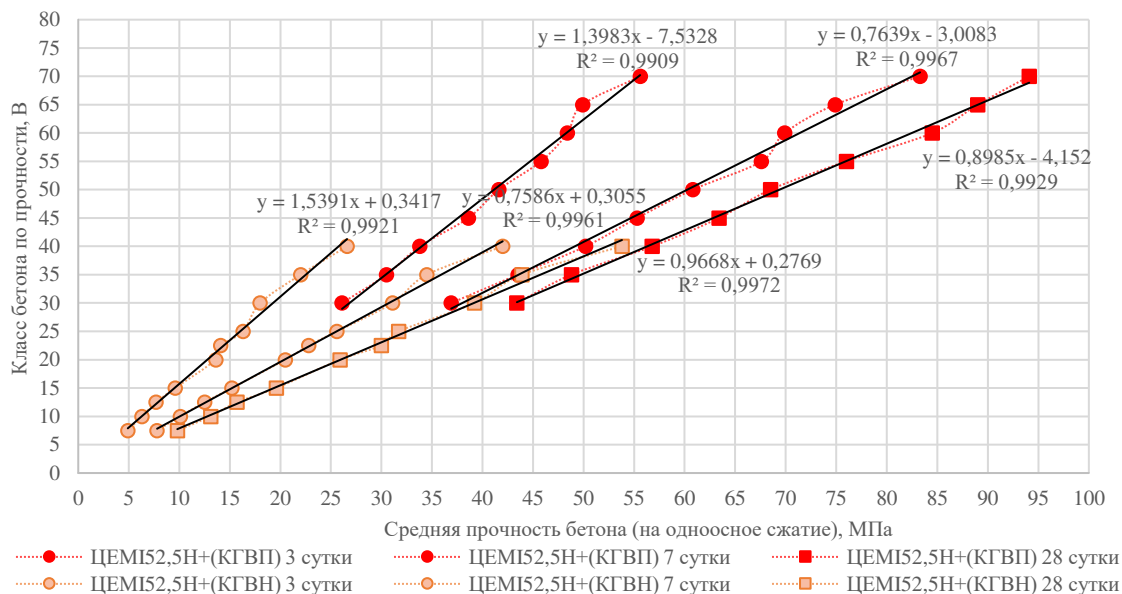


Рисунок 2.8 - Зависимости класса бетона от прочности на одноосное сжатие, при использовании нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок.

Увеличение доли добавки, вводимой в объем образцов бетона, имеет ограниченный потенциал: в случае добавки 1 ограничение у бетона В7,5-В20 составило 1,1%, у бетона В22,5-В25 - 1,2%, у бетона В30-В35 - 1,3%, у бетона В7,5-В20 - 1,4% от массы цемента. Свыше этого процентного соотношения получение бетона оказалось невозможным из-за потери однородности, сегрегации компонентов бетонов и проявлений водоотделения.

В случае добавки 2 возможный объем добавки составил у бетона В30-В35 - 0,4%, у бетона В40-В45 - 0,4%, у бетона В50-В55 - 0,5%, у бетона В60-В65 - 0,5%, и у бетона В70 - 0,6%. Увеличение добавки 2 свыше 0,6% приводило к аналогичным последствиям, как и с добавкой 1.

Бетон с ЦЕМІ42,5Н, добавкой 2, карьерным песком и известняковым щебнем не удалось получить из-за недостаточного количества вяжущего для проводимых экспериментов.

*Анализ зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе.* Определение класса прочности на растяжение при изгибе образцов создаваемого бетона проведено по методике ГОСТ 10180-2012 [110] на образцах-призмах размерами 100x100x400 мм<sup>3</sup> (рис. 2.9). Результаты измерений прочности на растяжение при изгибе в проектном возрасте по ГОСТ 10180-2012 [110] приведены в таблице 2, Приложение Б.

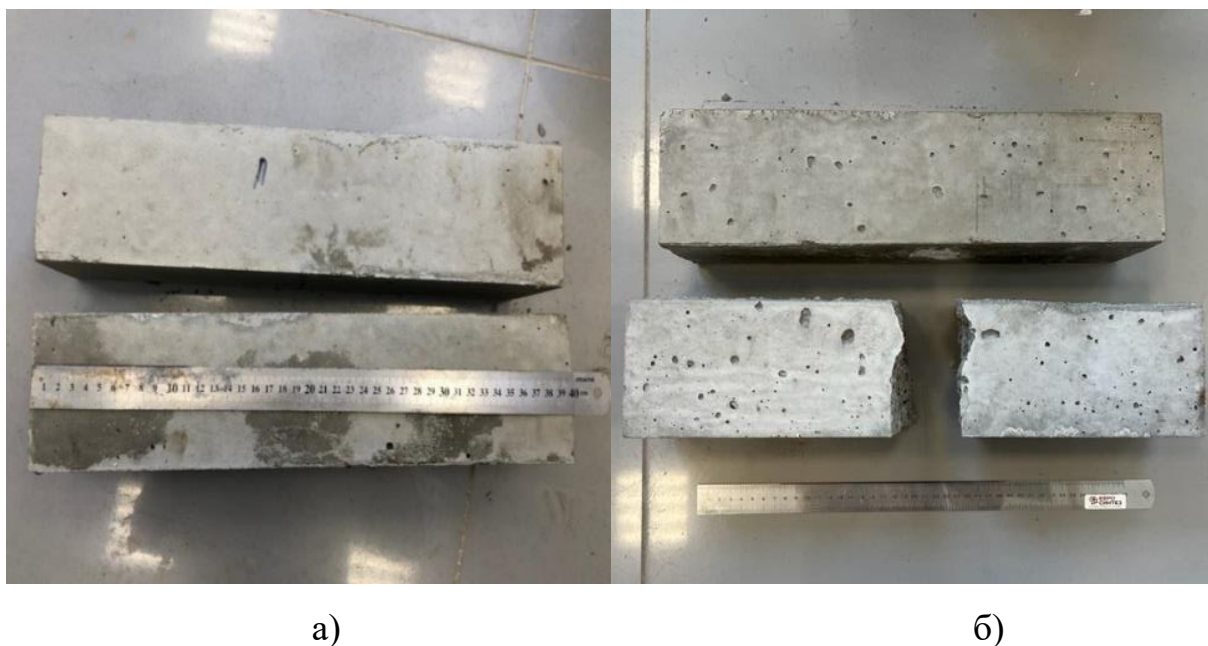


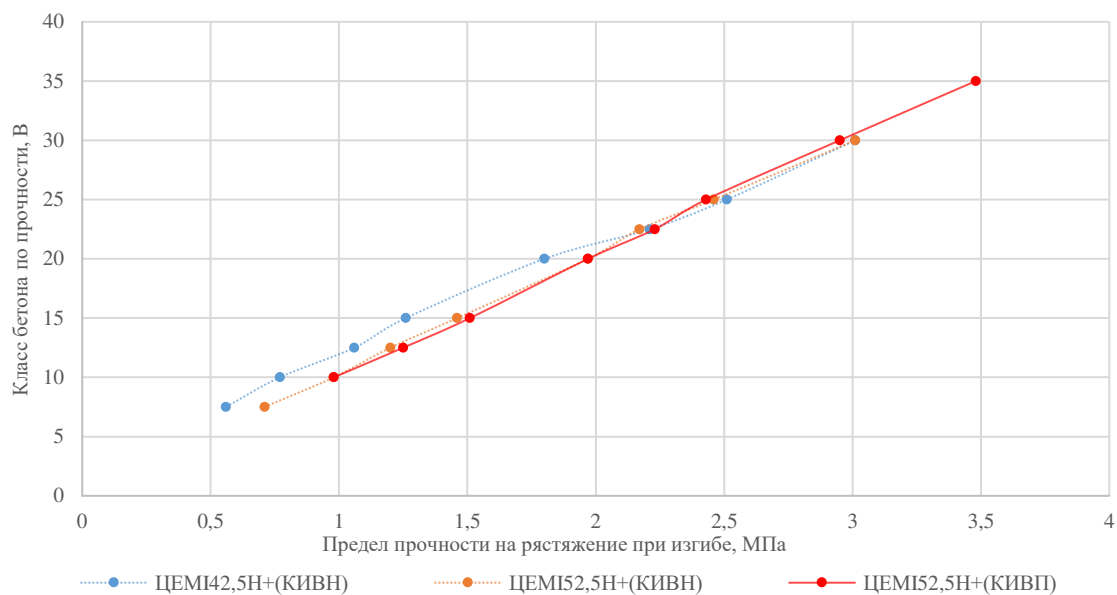
Рисунок 2.9 – Результаты испытаний на прочность бетона на растяжение при изгибе: а) образцы до испытания, б) образцы после испытания.

На рисунке 2.10, а), б) представлены зависимости, полученные на основе данных лабораторных экспериментов, которые показывают пластическую растяжимость бетона перед началом его разрушения, что видно из графиков, и таблицы 2, Приложения Б. Использование мелкозернистого наполнителя (песка карьерного и речного) и вяжущего ЦЕМІ42,5Н с добавкой 1 даёт эффект у образцов с карьерным песком В7,5-В20 от 2 до 16% ( $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  0,04-0,15 МПа), и у образцов с речным песком В22,5-В25 - 2-8% ( $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  0,06-0,18 МПа). Другие группы образцов не показали значимой динамики изменения.

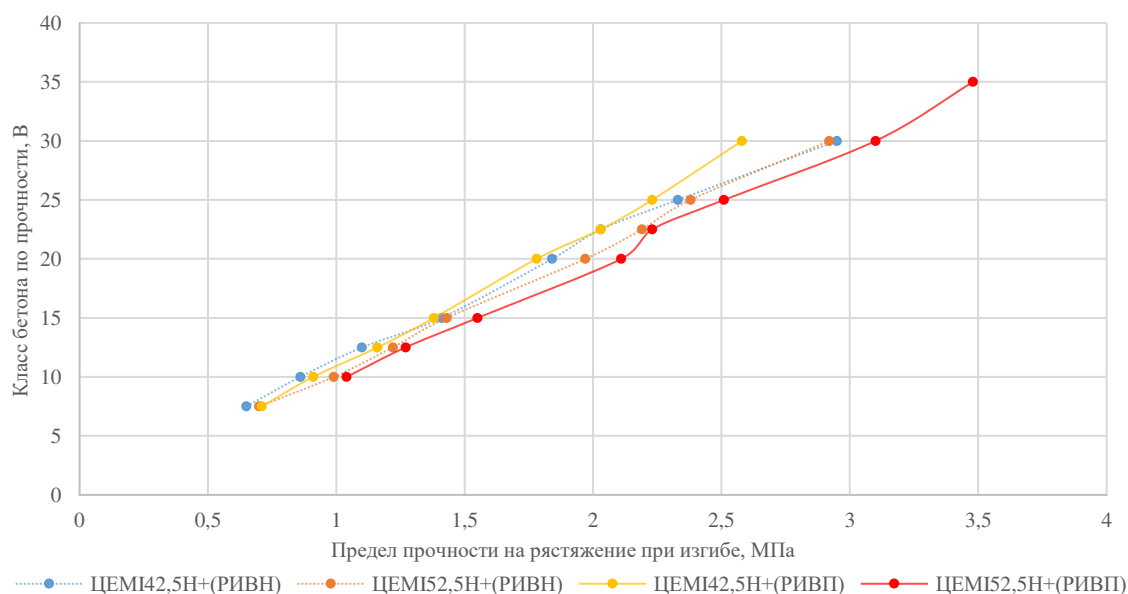
При замене вяжущего на ЦЕМІ52,5Н с добавкой 1 видно более стабильное взаимодействие с добавкой, и разница показателей прочности у мелкозернистого наполнителя составляет 1-3 % ( $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  0,01-0,09 МПа), у образцов с карьерным



песком разница показателей прочности в среднем составляет 11% ( $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе 0,1 МПа), с речным песком - 7% ( $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе 0,08 МПа).



а)



б)

Рисунок 2.10 - Зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н, нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавками: а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП.

Образцы, полученные с добавкой 2, цементом ЦЕМ I 52,5Н и карьерным песком, показали практически равные результаты аналогичного состава с речным

песком. Увеличение в среднем происходит на 3,3 % (от 0,02 до 0,15 МПа). Образцы бетона с составом ЦЕМІ42,5Н+(РИВН) имеют прочность, меньшую прочности образцов с составом ЦЕМІ52,5Н+(РИВН) в среднем от 8,5 % до 16% (от 0,11 МПа до 0,2 МПа), в зависимости от класса бетона.

Рисунки 2.11 а), б) и данные таблицы 2, приложение Б, показывают влияние крупнозернистого наполнителя (гранитного щебня) на упругие свойства образцов бетона с добавками 1 и 2. Добавка 1 обеспечивает получение бетонов классов В7,5-В40 со стабильными показателями и незначительными отличиями при замене вяжущего ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н с песком карьерным (разница составляет 2-4%, т.е. 0,01-0,08 МПа) и речным (разница составляет 2-5%, т.е. 0,01-0,1 МПа). Замена добавки 1 на 2 с идентичными составами приводит к аналогичному механизму, как и в случае  $\sigma_{сж}$ . Замена цемента (ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н) в составах с речным песком приводит к увеличению  $\sigma_{раст}$  при изгибе от 7,5% до 15% (от 0,08 МПа до 0,3 МПа), в составах с карьерным песком  $\sigma_{раст}$  при изгибе увеличивается от 2,5% до 6% (от 0,09 МПа до 0,4 МПа).

Использование карьерного и речного песка позволяет получить бетон классов В7,5-В70 (при речном песке – бетон В7,5-В40, при карьерном песке – бетон В30-В70).

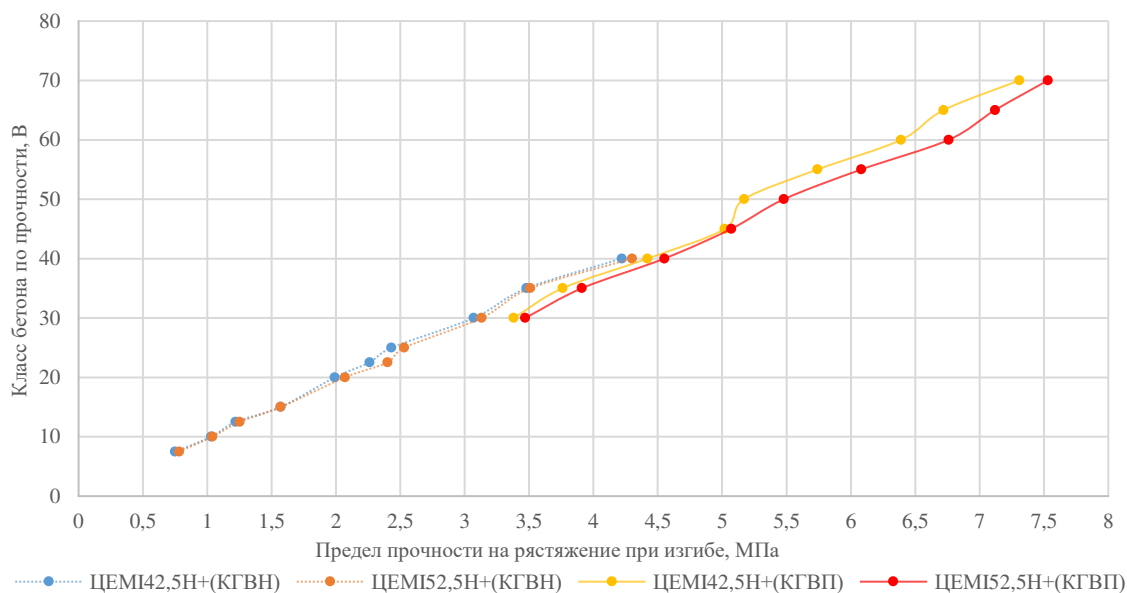
Увеличение  $\sigma_{раст}$  при изгибе в случае цемента ЦЕМІ42,5Н и замене речного песка на карьерный можно оценить по трём классам бетона В30, В35 и В40, так как они получены в обоих составах образцов (ЦЕМІ42,5Н+(РГВП), ЦЕМІ42,5Н+(КГВП).

У образцов с речным песком, у бетона В30 увеличение происходит на 10% (0,34 МПа), у бетона В35 – увеличение на 6% (0,22 МПа), у бетона В40 - на 9% (0,41 МПа).

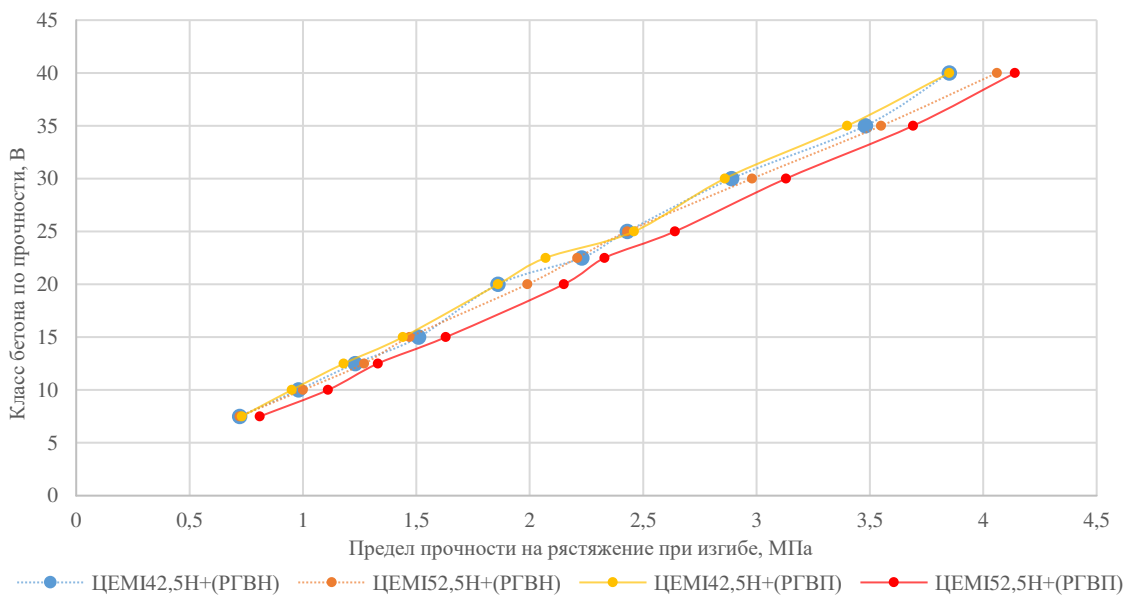
У образцов с карьерным песком, у бетона В30 увеличение происходит на 15% (0,52 МПа): у В35 - на 10% (0,36 МПа), у В40 - на 13% (0,57 МПа).

Зависимости на рисунках 2.10 а), 2.11 а) и данные таблицы 2 Приложение Б указывают на влияние крупнозернистого наполнителя (щебня известнякового и гранитного) в составе образцов бетона с цементом ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н.

В случае ЦЕМІ42,5Н замена крупнозернистого наполнителя с добавкой 1 обеспечивает получение образцов бетона В7,5-В30. Увеличение прочности составляет 10-30 % (0,5 МПа - 0,30 МПа) от средней прочности класса бетона. Замена вяжущего на ЦЕМІ52,5Н с теми же составами даёт увеличение прочности в диапазоне 3-10% (0,05 МПа – 0,1 МПа).



а)



б)

Рисунок 2.11 - Зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе. Составы с вяжущим марок ЦЕМ І 42,5Н, ЦЕМ І 52,5Н, нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавками: а) КГВН и КГВП, б) РГВН и РГВП.

Замена добавки 1 на 2 позволила получить образцы бетона классов от В10 до В40 с добавлением известнякового щебня, при добавлении щебня гранитного – от В30 до В70.

Образцы на основе цемента ЦЕМІ52,5Н с известняковым щебнем обеспечили получение бетона классов В10-В35, образцы с гранитным щебнем обеспечили получение бетона классов В30-В70.

В связи с этим анализ приводится на двух образцах классов В30 и В35, присутствующих в образцах с применением обоих вяжущих.

В случае с В30 увеличение  $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  от замены щебня известнякового на гранитный составляет 17% (0,52 МПа), у В35 12% (0,43 МПа) от средней прочности класса бетона.

В связи с отсутствием серии образцов ЦЕМІ42,5Н+(КИВП), образцы серии ЦЕМІ42,5Н+(КГВП) сравниваем с серией ЦЕМІ52,5Н+(КГВП), в данных таблицы 2 Приложение Б показана разница от 2,5% до 6% (от 0,05 МПа до 0,4 МПа).

Причиной роста  $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  являются особенности структур гранита и известняка, позволяющие более эффективно взаимодействовать добавке 2 с цементом и наполнителями.

На рисунке 2.12 приведены зависимости влияния нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок на формирование показателей прочности на растяжение при изгибе образцов с компонентами составов ЦЕМІ52,5Н+(КГВН), ЦЕМІ52,5Н+(КГВП). Как видно из данных таблицы 2 Приложение Б, эти два состава демонстрируют лучшие показатели прочности, с добавлением промытого карьерного песка и гранитного щебня.

Добавка 1 в комбинации с вяжущим ЦЕМІ52,5Н обеспечивает получение образцов с  $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  от 0,78 до 4,3 МПа, что соответствует бетонам класса В7,5-В40.

Применение 1,1% добавки 1 (от массы цемента) с увеличением вяжущего с шагом в 20 кг позволило достичь рост  $\sigma_{\text{раст при изгибе}}$  в среднем 0,26 МПа и получить образцы класса В7,5-В15, для получения образца бетона класса В20. С

применением 1,1% добавки пришлось увеличить объём вяжущего до 30 кг, что обеспечило увеличение  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,5 МПа.

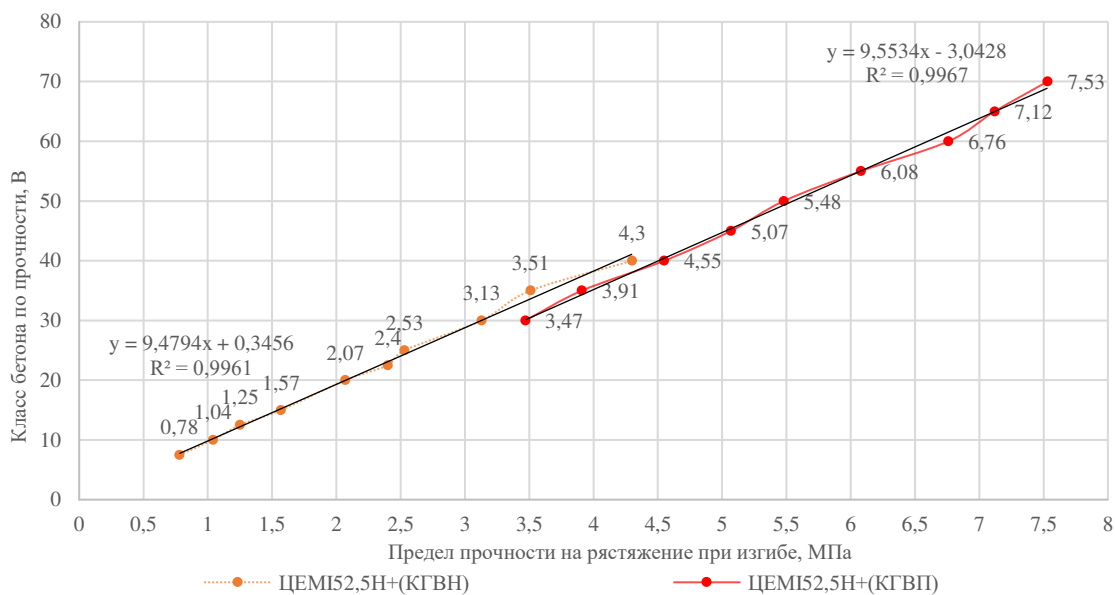


Рисунок 2.12 - Зависимости класса бетона от прочности на растяжение при изгибе, с использованием нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Применение данного объёма добавки было не эффективно и требовалось её повысить до 1,2%, что потребовало увеличения массы вяжущего до 30 кг (для понижения вовлечённого воздуха и нивелирования пористости получаемого цементного камня) в случае бетона класса В22,5 (прибавка  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе составила 0,33 МПа), затем ещё дополнительно 20 кг в случае бетона класса В25 (прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе составил 0,13 МПа).

Для увеличения динамики доля добавки 1 была увеличена до 1,3%, прибавка вяжущего составила 30 кг, получены образцы бетона В30 (прибавка  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе 0,6 МПа), В35 (прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе 0,38 МПа), далее увеличение добавки 1 - до 1,4%, получение образца бетона В40 (возрастание  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,8 МПа).

Добавка 2 в комбинации с вяжущим ЦЕМ I 52,5Н обеспечивает получение образцов с прочностью от 3,47 МПа до 7,53 МПа, что соответствует бетонам класса В30-В70. Увеличение доли добавки происходило:

- 0,4% у бетона В30-В35 (+ вяжущего 25 кг, увеличение  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,44 МПа);
- 0,4% у бетона В40 (+ вяжущего 20 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,64 МПа);
- 0,4% у бетона В45 (+вяжущего 10 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,52 МПа);

- 0,5% у бетона В50 (+ вяжущего 5 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,41 МПа);
- 0,5% у бетона В55 (+ вяжущего 5 кг, повышение  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,6 МПа);
- 0,5% у бетона В60 (+ вяжущего 10 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 1,5 МПа);
- 0,5% у бетона В65 (+ вяжущего 20 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,48 МПа);
- 0,6% у бетона В70 (+ вяжущего 20 кг, прирост  $\sigma_{\text{раст}}$  при изгибе на 0,4 МПа).

*Анализ зависимости класса бетона от средней плотности.* Определение плотности бетона проводилось на образцах-кубах размерами 100x100x100 мм<sup>3</sup> (рис. 2.13) в состоянии нормальной влажности по методике ГОСТ 12730.1-2020 [111]. В таблице 1 Приложение Б представлены результаты испытаний бетонов на определение плотности. Набор различных исходных компонентов, применяемых в составе образцов бетонов, определяет разную природу взаимодействия их между собой, при замене вяжущего, добавки и при изменении водоцементного отношения, для получения оптимального состава по компонентам и классу бетона.



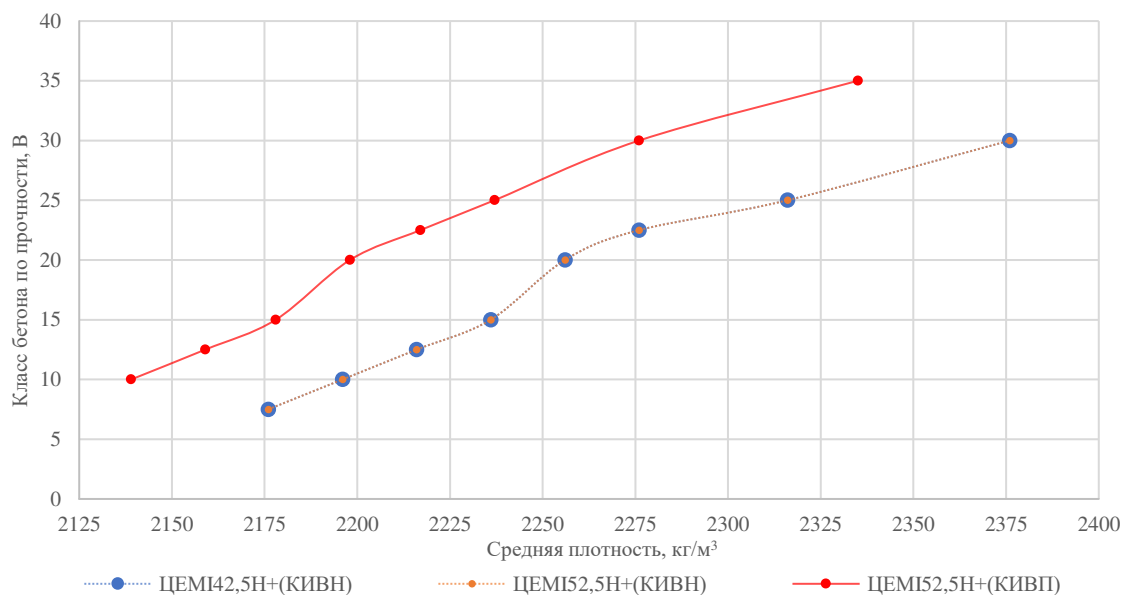
а)

б)

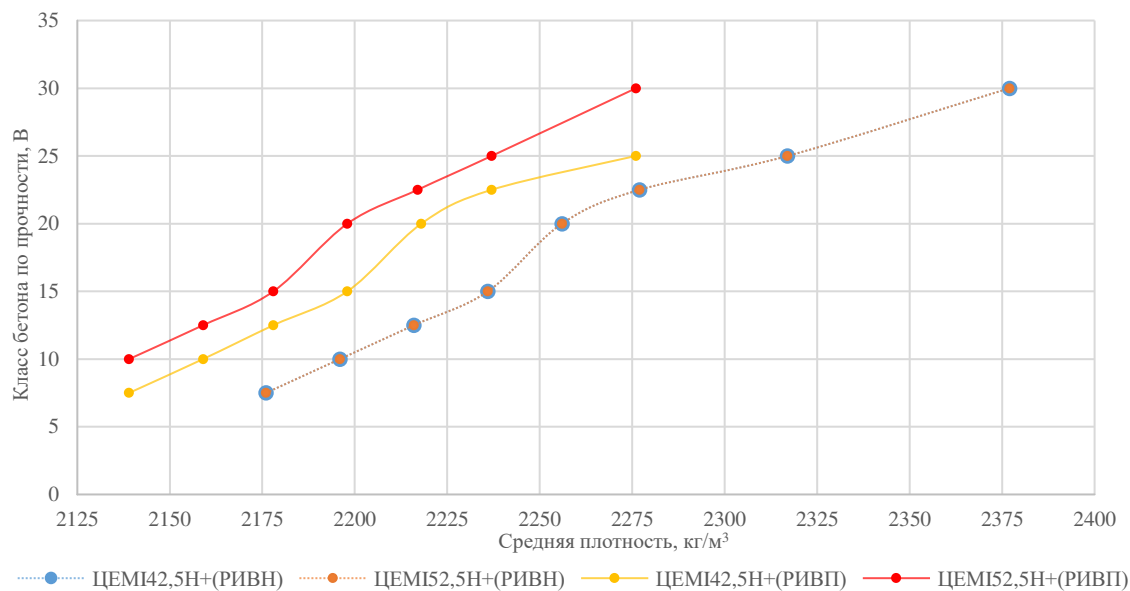
Рисунок 2.13 - Образцы бетона для определения плотности: а) крупнозернистый наполнитель щебень известняковый, б) крупнозернистый наполнитель щебень гранитный.

Зависимости, изображенные на рисунке 2.12 а), б) демонстрируют влияние замены мелкозернистого наполнителя при двух сценариях: при замене цемента

(ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н) и замене добавки 1 на 2. Как видно из данных таблицы 1 Приложение Б и рисунка 2.14 а) карьерный песок позволяет получить стабильные и идентичные показатели плотности при замене вяжущего ЦЕМІ42,5Н на ЦЕМІ52,5Н при получении образцов бетона класса В7,5-В35 ( $\rho=2176-2377 \text{ кг/м}^3$ ) и уменьшении водоцементного (В/Ц) отношения у бетона класса В7,5 ( $\rho=2176 \text{ кг/м}^3$ ).



а)



б)

Рисунок 2.14 - Зависимости класса бетона от средней плотности. Составы с вяжущим марок ЦЕМ І 42,5Н, ЦЕМ І 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП.

Стабильность в снижении В/Ц отношения у бетона В30 обусловлена «работой» добавки 1 в объеме 1,4% от массы цемента, обеспечивающей 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. Ввиду отсутствия образцов бетонов ЦЕМІ42,5Н+(КИВП) с добавкой 2, не производится сравнительный анализ с ЦЕМІ52,5Н+(КИВП), но анализируя аналогичный состав на добавке 1, можно сделать вывод о схожей природе протекающих процессов в диапазоне образцов бетона класса В10-35 ( $\rho=2139-2235 \text{ кг/м}^3$ ), В/Ц от 0,98 до 0,54 при 0,5% добавки 2 от массы цемента.

На рисунке 2.14 б) показано, что замена карьерного песка на речной обеспечивает получение образцов бетонов максимум до класса В30. Применение добавки 1 позволяет получить бетон класса В7,5 с  $\rho=2139-2235 \text{ кг/м}^3$  при В/Ц = 0,88 - 0,49 у образцов с вяжущим ЦЕМІ42,5Н и В/Ц= 0,93-0,5 у образцов с вяжущим 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  $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,98 добавки 0,5%), класс В30  $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,54 добавки 0,6%).

У образцов с вяжущим ЦЕМІ52,5Н: класс В10  $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,98 добавки 0,4%), класс В35  $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,54 добавки 0,4%).

Данные отличия обусловлены тем, что поликарбоксилатные пластификаторы помимо электростатической стабилизации обеспечивают еще и стерическую сплошность, благодаря чему структура бетона становится менее дефектной.

На рисунках 2.15 а), б) показаны зависимости изменения плотности бетона от фактора замены крупнозернистого наполнителя. Как видно из рисунков 2.15 а), б) и данных таблицы 1 Приложение Б, замена известнякового щебня на гранитный приводит, как и с карьерным песком, к стабильным и практически идентичным показателям плотности у образцов с вяжущим ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, при



разном В/Ц отношении. Применение добавки 1 с вяжущим ЦЕМ I 42,5Н позволяет получить образцы бетонов класса В7,5-В40 на:

- промытом карьерном песке от  $\rho=2176 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,94, добавка 1,1%) до  $\rho=2456 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц=0,44, добавка 1,4%);
- речном песке от  $\rho=2206 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,95, добавка 1,3%) до  $\rho=2457 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,44, добавка 1,5%).

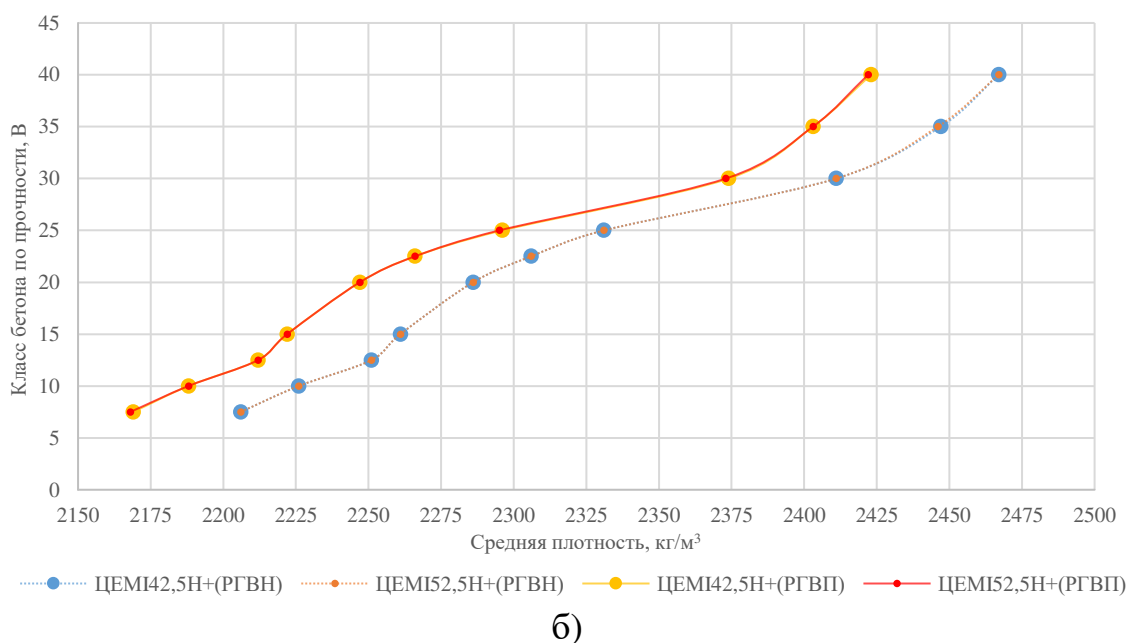
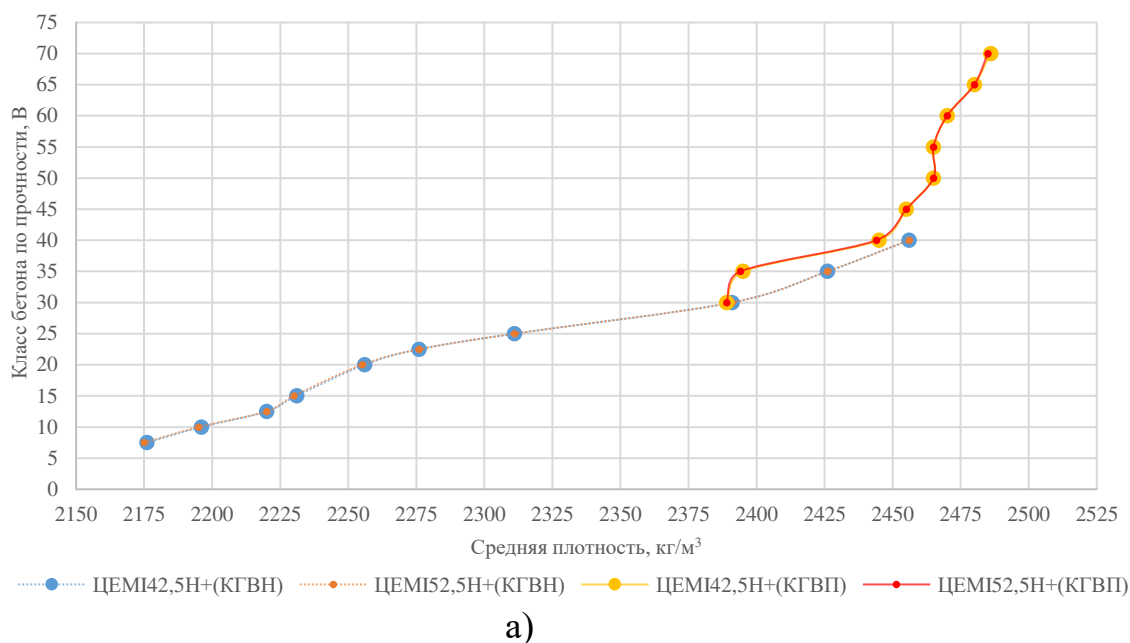


Рисунок 2.15 - Зависимости класса бетона от средней плотности. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КГВН и КГВП, б) РГВН и РГВП.

Аналогичные показатели на ЦЕМІ52,5Н В7,5-В40 на:

- промытом карьерном песке от  $\rho=2175 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 1,0, добавка 1,1%) до  $\rho=2456 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,45, добавка 1,4%);
- речном песке от  $\rho=2206 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц=1,0, добавка 1,3%) до  $\rho=2457 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,45, добавка 1,5%).

Применение добавки 2 показало аналогичную природу процесса у образцов бетона классов В30-В70 на промытом карьерном песке с:

- ЦЕМІ42,5Н от  $\rho=2389 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,49, добавка 0,4%) до  $\rho=2486 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,33, добавка 0,7%);
- ЦЕМІ52,5Н от  $\rho=2389 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,49, добавка 0,4%) до  $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,33, добавка 0,6%).

У образцов на речном песке получены классы В7,5-В40 с:

- ЦЕМІ42,5Н от:  $\rho=2169 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц== 1,03, добавка 0,5%) до  $\rho=2423 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц= 0,48, добавка 0,6%);
- ЦЕМІ52,5Н от  $\rho=2168 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =1,03, добавка 0,4%) до  $\rho=2422 \text{ кг/м}^3$  (В/Ц =0,48, добавка 0,4%).

На рисунках 2.14 а), 2.15 а) показан вклад известнякового и гранитного щебня в плотность образцов бетона.

Известняковый щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов класса В7,5-В30 на ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2176\text{-}2376 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =0,9-0,5) и ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2176\text{-}2376 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =0,95-0,51).

Гранитный щебень обеспечивает образцы бетонов В7,5-В40 ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2176\text{-}2456 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =0,94-0,44) и ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2175\text{-}2456 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =1,0-0,45).

Известняковый щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов классов В10-В35 на ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2139\text{-}2335 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц= 0,98-0,54).

Гранитный щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов классов В30-В70 на ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2389\text{-}2486 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =0,49-0,33) и ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2389\text{-}2485 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц =0,49-0,33).

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущими ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетона классов от В7,5 до В70 с плотностью от 2175 кг/м<sup>3</sup> до 2493 кг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 2.16 показана зависимость класса бетона от плотности, при использовании нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Применение добавок позволяет изменить процесс водоредукции при стабилизации коллоидной системы бетона и увеличить количество исходных сырьевых материалов, активно применяемых в 1 м<sup>3</sup> бетона. Как видно из таблицы 1 Приложения Б и рисунка 2.16, увеличение плотности образцов бетона с применением добавок происходит прямо пропорционально увеличению их дозировки (%) от массы цемента. Это в свою очередь даёт возможность менять В/Ц отношение и увеличивать долю вяжущего (и компонентов) в 1 м<sup>3</sup> бетона.

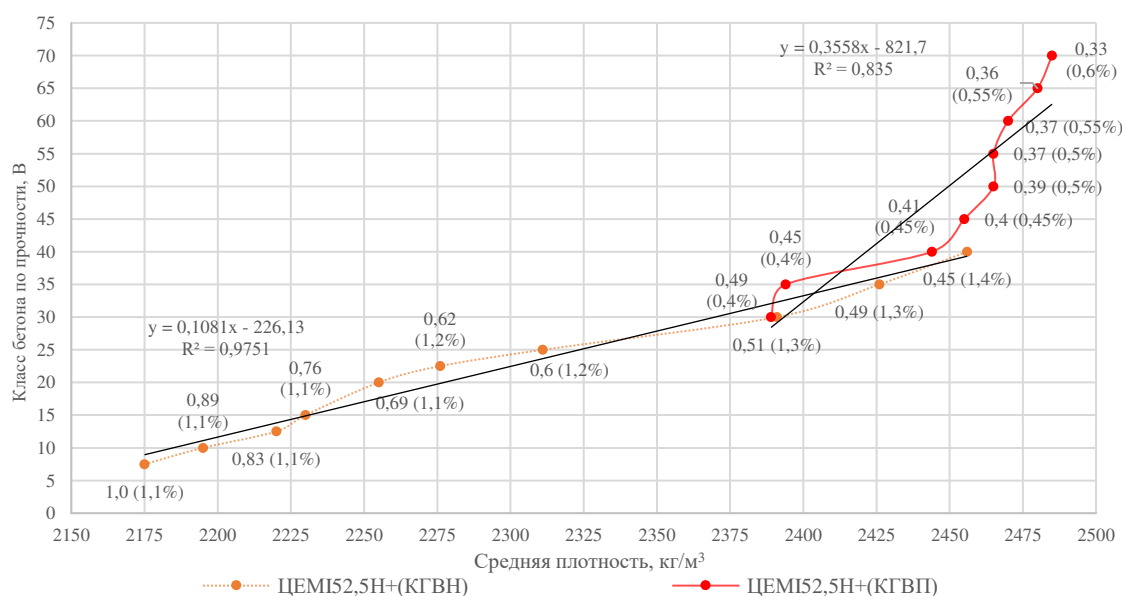


Рисунок 2.16 - Зависимости класса бетона от средней плотности, с использованием нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Так, в образцах с применением добавки 1 (доля добавки составляет 1,1%-1,4%), плотность бетона составляет 2175-2456 кг/м<sup>3</sup>, их В/Ц = 1,0-0,45.

В образцах с применением добавки 2 плотность бетона составляет 2389-2485 кг/м<sup>3</sup>, их В/Ц = 0,49-0,33, (доля добавки составляет 0,4%-0,6% от массы цемента).

*Анализ зависимости водопоглощения от средней плотности бетона.*  
Определение водопоглощения ( $W_o$ ) составов бетонов проведено на образцах-кубах  $100 \times 100 \times 100$  мм<sup>3</sup> (рис. 2.17) в соответствии с методикой ГОСТ 12730.3-2020 [112]. Результаты испытаний на водопоглощение приведены в таблице 2 Приложения Б.

На Рис. 2.18 и 2.19 показана способность образцов бетона с разным уровнем плотности поглощать влагу, с учётом их структурных особенностей (капиллярно-пористого строения [100-103]).

Рисунки 2.18 а), б) и результаты испытаний, представленные в таблице 2 Приложения Б, показывают зависимость гигроскопического водопоглощения образцов бетонов с крупнозернистым известняковым щебнем. Как было отражено ранее, известняк обладает пористостью 5,4-7,3%, водопоглощением ~2,5%, это является причиной дополнительного увеличения объёма насыщения влагой образцов при испытаниях.

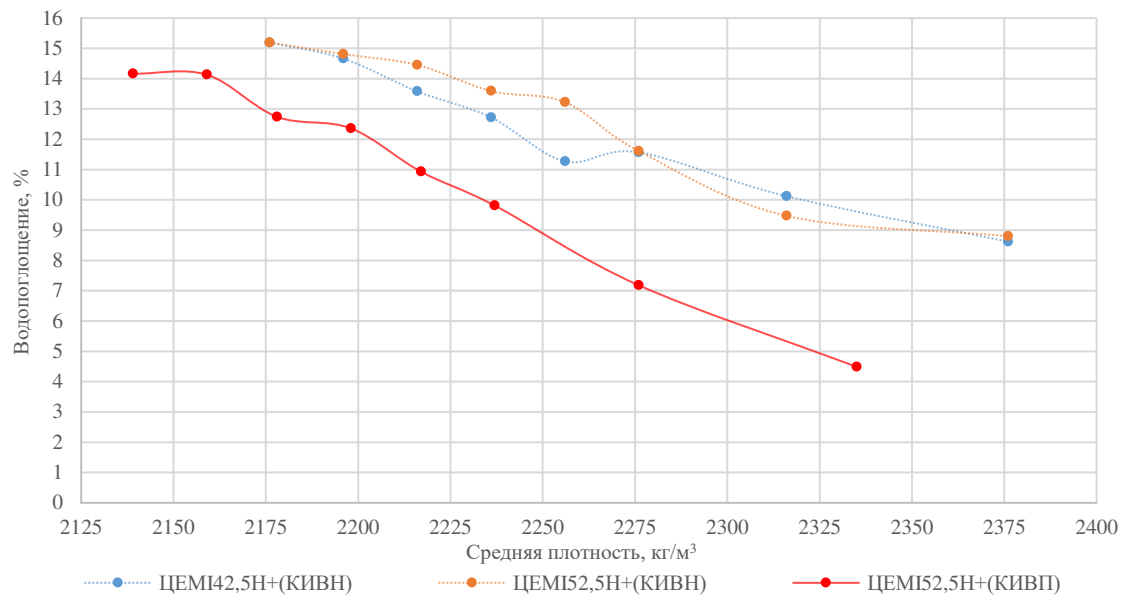


Рисунок 2.17 - Образец бетона для исследования зависимости водопоглощения от плотности.

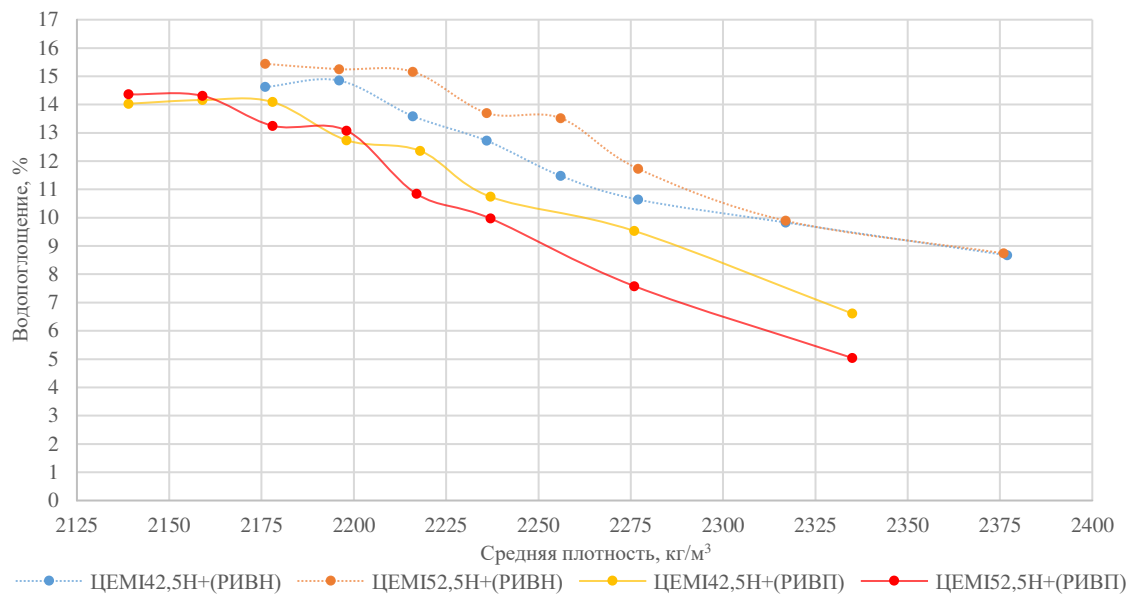
Образцы на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с известняковым щебнем, применением добавки 1 обладают плотностью 2176-2377 кг/м<sup>3</sup> и  $W_o = 15-8,5\%$ :

- с промытым карьерным песком от  $\rho = 2176$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o = 15,19\%$ , до  $\rho = 2376$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o = 8,62\%$ ;

- с речным песком от  $\rho = 2176$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o = 14,62\%$ , до  $\rho = 2377$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o = 8,67\%$ .



а)



б)

Рисунок 2.18 - Зависимости водопоглощения бетона от плотности бетона 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

Образцы на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н с известняковым щебнем:

- промытым карьерным песком обладают плотностью от  $\rho=2176 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 15,25\%$ , до  $\rho=2376 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 8,8\%$ ;
- с речным песком от  $\rho=2176 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 15,44\%$ , до  $\rho=2376 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 8,67\%$ .

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

На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком плотностью от  $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,03\%$  до  $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 6,61\%$ .

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н:

- с промытым карьерным песком плотностью от  $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,16\%$ , до  $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 4,49\%$ ,
- с речным песком плотностью от  $\rho=2139 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,36\%$ , до  $\rho=2335 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 5,04\%$ .

Рисунки 2.19 а), б) и данные таблицы 2 Приложения Б свидетельствуют о том, что замена крупнозернистого наполнителя с известнякового на гранитный, обладающего более низкой пористостью (0,2-4%), водопоглощением (0,15-1,3%), обеспечила получение более плотных образцов бетона.

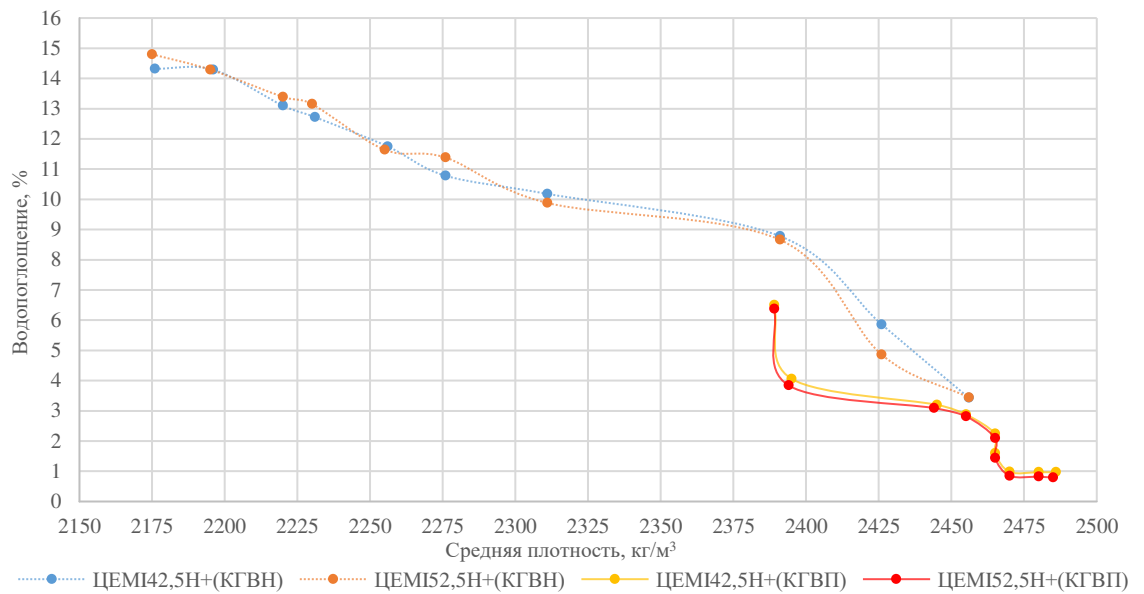
Образцы с добавкой 1 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н:

- с промытым карьерным песком обладают плотностью и показателем водопоглощения от  $\rho=2176 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,32\%$ , до  $\rho=2456 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 3,43\%$ ;
- с речным песком обладают плотностью и показателем водопоглощения от  $\rho=2206 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,16\%$ , до  $\rho=2467 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 3,49\%$ .

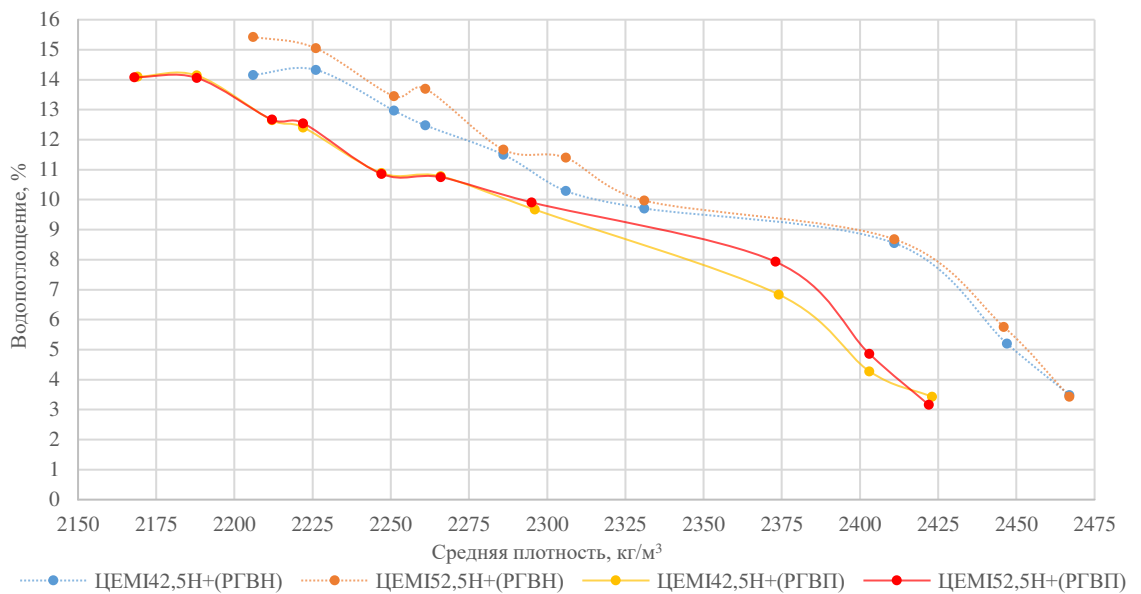
На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с:

- промытым карьерным песком от  $\rho=2175 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 14,8\%$ , до  $\rho=2456 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 3,44\%$ ;
- речным песком от  $\rho=2206 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 15,43\%$ , до  $\rho=2467 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o = 3,43\%$ .

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



а)



б)

Рисунок 2.19 - Зависимости водопоглощения бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КГВН и КГВП, б) РГВН и РГВП

Образцы на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н:

- с промытым карьерным песком обладают характеристиками от  $\rho=2389 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o=6,38\%$  до  $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o=0,79\%$ ,
- с речным песком от  $\rho=2168 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o=14,08\%$  до  $\rho=2422 \text{ кг/м}^3$ ,  $W_o=3,16\%$

Анализ данных таблицы 2 Приложения Б и рисунков 2.18 а) и 2.19 а) выявляет влияние известнякового и гранитного щебня на показатели водопоглощения образцов бетонов разных классов.

Известняковый щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов классов В7,5-В30 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2176-2376$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=15,19-8,62\%$ ) и вяжущем ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2176-2376$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=15,19-8,8\%$ ).

Гранитный щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов классов В7,5-В40 на ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2176-2456$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=14,32-3,43\%$ ) и ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2175-2456$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=14,8-3,44\%$ ).

Добавка 2 с известняковым щебнем обеспечивает получение образцов классов В10-В35 на ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2139-2335$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=14,16-4,49\%$ ).

Добавка 2 с гранитным щебнем обеспечивает получение образцов классов В30-В70 на ЦЕМІ42,5Н ( $\rho=2389-2486$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=6,5-0,97\%$ ), образцов на ЦЕМІ52,5Н ( $\rho=2389-2485$  кг/м<sup>3</sup>,  $W_o=6,38-0,79\%$ ).

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущими ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетонов от В7,5 до В70 с наименьшими показателями водопоглощения.

На Рис. 2.20 показано влияние нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок на показатель водопоглощения бетона на основе вяжущим ЦЕМІ52,5Н.

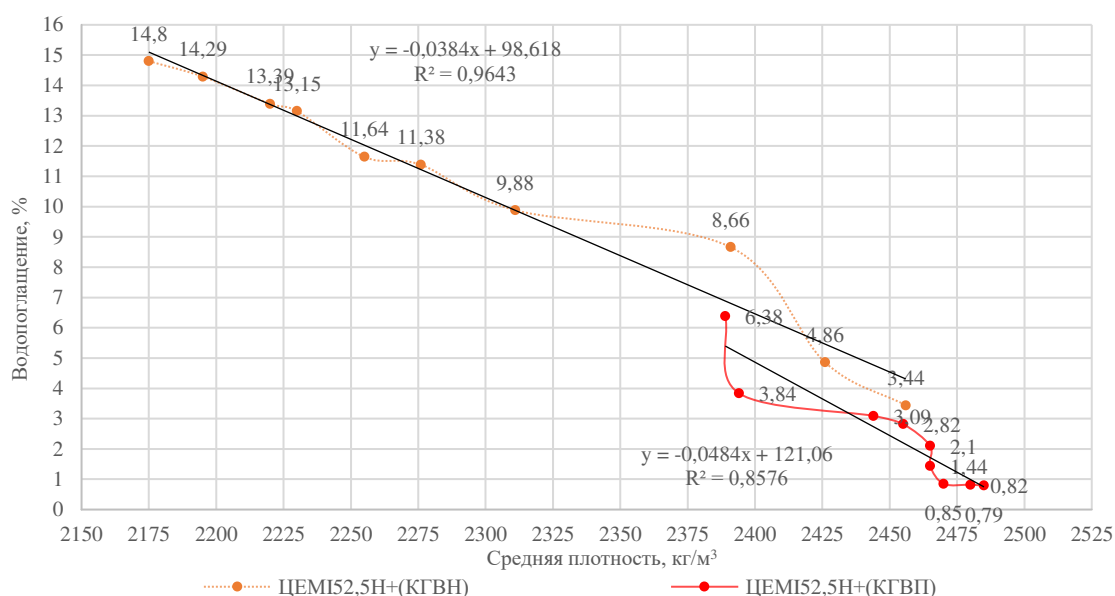


Рисунок 2.20 - Зависимости водопоглощения бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.



Как следует из таблицы 2 Приложения Б и рисунка 2.20, увеличение плотности образцов бетона с применением добавок приводит к уменьшению процента водопоглощения.

Применение добавки 1 от 1,1% до 1,4% позволяет эффективно понизить общую и капиллярную пористость образцов с плотностью 2175-2456 кг/м<sup>3</sup> и, следовательно, понизить водопоглощение с 14,8% до 3,44%.

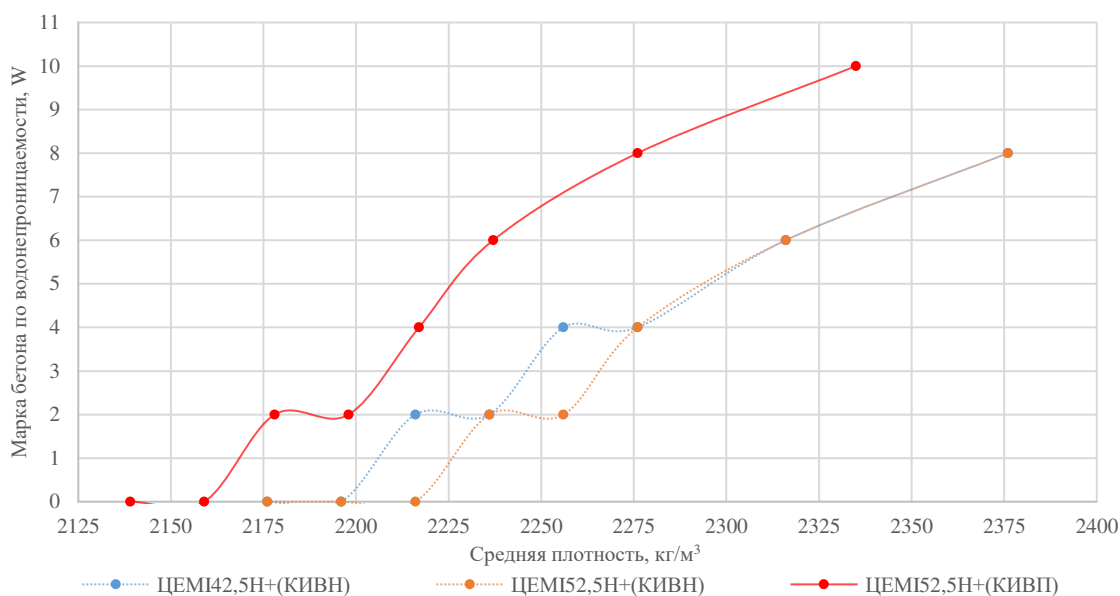
Применение добавки 2 в объёме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет достичь более высоких значений плотности - 2389-2485 кг/м<sup>3</sup>. Стерический эффект, которым обладают молекулы поликарбоксилата при отверждении образцов бетона, приводит к более плотной упаковке компонентов бетона, и, как следствие, к более эффективной кальматации капилляров. О влиянии стерического эффекта молекул добавки 2 указывают показатели водопоглощения.

*Анализ зависимости водонепроницаемости от средней плотности бетона.* Определение марки бетона по водонепроницаемости (W) проведено на образцах-цилиндрах диаметром 150 мм толщиной 50 мм (рис. 2.21), методом «мокрого пятна», в соответствии с п.4 ГОСТ 12730.5-2018 [113]. В таблице 2 Приложения Б приведены результаты исследований водонепроницаемости (марки) образцов.

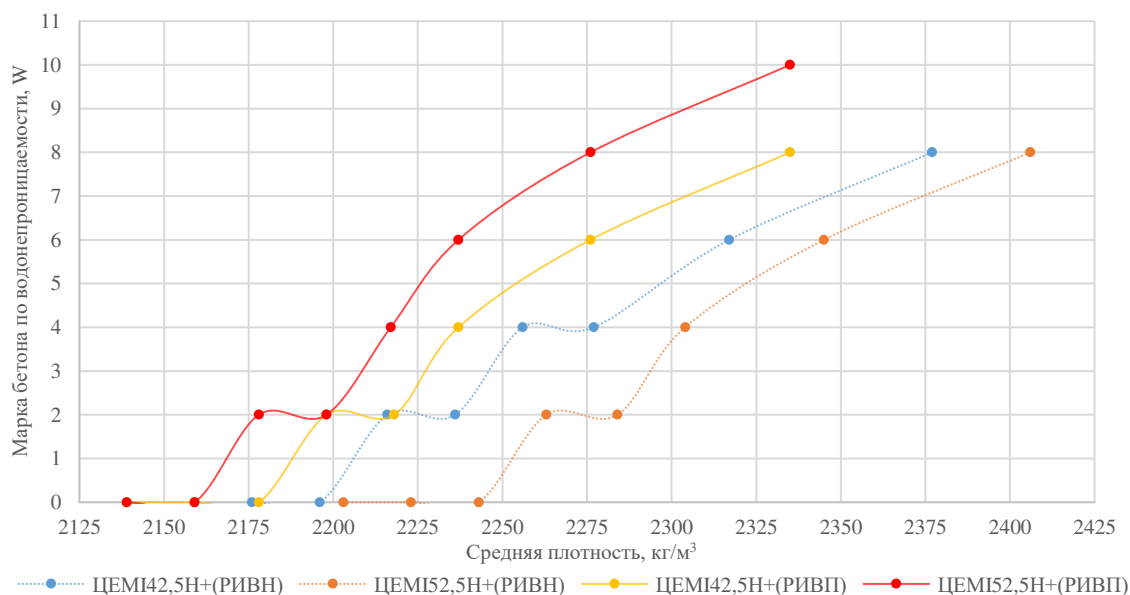


Рисунок 2.21 - Образец бетона на водонепроницаемость.

На рисунках 2.22 а), б) и в таблице 2 Приложения Б видно, 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 образцов бетона, их пористость влияет на общие показатели водонепроницаемости [85-88, 94-99].



а)



б)

Рисунок 2.22 - 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.

Образцы с крупнозернистым известняковым наполнителем, применением добавки 1, обладающие плотностью 2176-2377 кг/м<sup>3</sup> и водонепроницаемостью W0-W8, на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с промытым карьерным и речным песком, имеют одинаковые результаты с образцами, плотностью  $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup>, W0,  $\rho=2216-2376$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W10.

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком, при плотности:

- $\rho=2176-2216$  кг/м<sup>3</sup>, образцы обладают водонепроницаемостью W0;
- $\rho=2236-2376$  кг/м<sup>3</sup> водонепроницаемость равна W2-W10.

Применение добавки 2 позволило получить более монолитные и устойчивые к проникновению воды образцы. На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком образцы с плотностью  $\rho=2139-2178$  кг/м<sup>3</sup>, имеют водонепроницаемость, равную W0, при плотности  $\rho=2198-2335$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость равна W2 - W8.

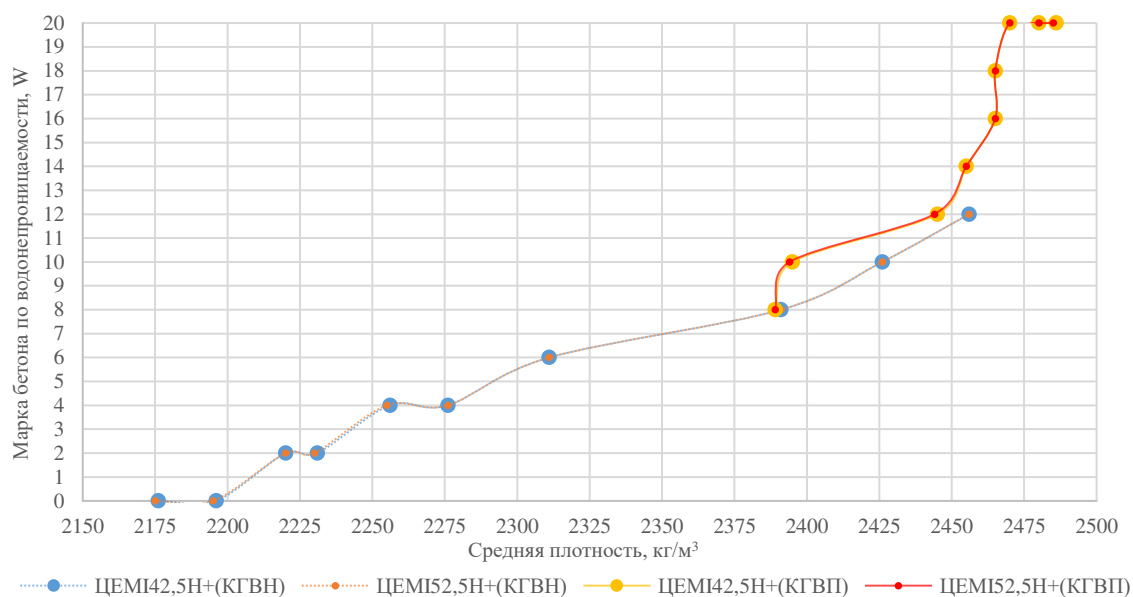
На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком образцы демонстрируют подобные результаты, с плотностью  $\rho=2139-2159$  кг/м<sup>3</sup> водонепроницаемость равна W0, с плотностью  $\rho=2178-2335$  кг/м<sup>3</sup> водонепроницаемость равна W2- W10.

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком образцы демонстрируют подобные результаты, с плотностью  $\rho=2139-2159$  кг/м<sup>3</sup> водонепроницаемость равна W0, с плотностью  $\rho=2178-2335$  кг/м<sup>3</sup> водонепроницаемость равна W2- W10.

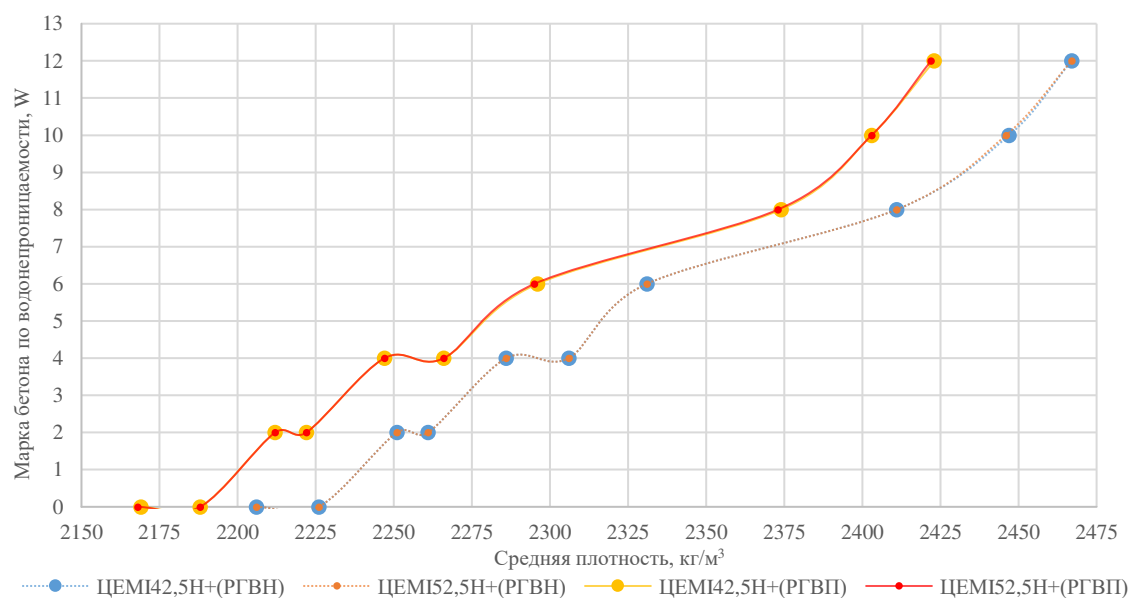
Рисунки 2.23 а), б) и данные таблицы 2 Приложения Б свидетельствуют о том, что замена крупнозернистого известнякового наполнителя на гранитный, обладающий более низкой пористостью (0,2-4%), обеспечила получение более плотных образцов бетона.

Образцы с добавкой 1 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н обладают водонепроницаемостью W0-W12:

- с промытым карьерным песком при  $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup>, W0,  $\rho=2220-2456$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W12;



а)



б)

Рисунок 2.23 - Зависимости водонепроницаемости от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КГВН и КГВП, б) РГВН и РГВП.

- с речным песком при  $\rho=2206\text{--}2226$  кг/м³ имеют водонепроницаемость W0, при  $\rho=2251\text{--}2467$  кг/м³ имеют водонепроницаемость W2-W12.

На вяжущем ЦЕМ I 52,5Н:

- с промытым карьерным песком при  $\rho=2175\text{--}2195$  кг/м³, водонепроницаемость W0, при  $\rho=2220\text{--}2456$  кг/м³ водонепроницаемость W2-W12);

- с речным песком при  $\rho=2206-2226$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W0, при  $\rho=2251-2467$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W2-W12).

Применение добавки 2 с карьерным песком позволило получить образцы с максимальными показателями водонепроницаемости W8-W20, на вяжущем ЦЕМІ42,5Н, образцы:

- с плотностью  $\rho=2389$  кг/м<sup>3</sup>, W8;  $\rho=2455$  кг/м<sup>3</sup>, W14;  $\rho=2465$  кг/м<sup>3</sup>, W18;  $\rho=2470-2486$  кг/м<sup>3</sup>, W20;

- с речным песком, образцы с плотностью  $\rho=2169-2188$  кг/м<sup>3</sup>, W0;  $\rho=2212-2423$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W12.

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н образцы:

- с промытым карьерным песком с плотностью  $\rho=2389$  кг/м<sup>3</sup>, W8;  $\rho=2455$  кг/м<sup>3</sup>, W14;  $\rho=2465$  кг/м<sup>3</sup>, W18;  $\rho=2470-2485$  кг/м<sup>3</sup>, W20;

- с речным песком обладают плотностью  $\rho=2169-2188$  кг/м<sup>3</sup>, W0;  $\rho=2212-2422$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W12.

Зависимости на рисунке 2.22 а), 2.23 а) и данные таблицы 2 Приложения Б демонстрируют влияние известнякового и гранитного щебня на способность образцов сохранять устойчивость при проникновении в них воды.

Известняковый щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов на цементе ЦЕМІ42,5Н классов В7,5-В10 ( $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W0) и В12,5-В30 ( $\rho=2216-2376$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W8).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н образцы классов В7,5-В12,5 ( $\rho=2176-2216$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W0), и В15-В30 ( $\rho=2236-2376$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W2-W8).

С гранитным щебнем получены образцы на ЦЕМІ42,5Н классов В7,5-В10 ( $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W0), и В12,5-В40 ( $\rho=2220-2456$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W2- W12).

На ЦЕМІ52,5Н получены образцы классов В7,5-В10 ( $\rho=2175-2195$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W0), и В12,5-В40 ( $\rho=2220-2456$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W2-W12).

Известняковый щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов на вяжущем ЦЕМІ52,5Н классов В10-В12,5 ( $\rho=2139-2159$  кг/м<sup>3</sup>, W0), классов В15-В35 ( $\rho=2178-2335$  кг/м<sup>3</sup>, W2-W10).

Гранитный щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов на вяжущем:

- ЦЕМІ42,5Н классы В30-В70 ( $\rho=2389-2486$  кг/м<sup>3</sup>, W8-W20);
- ЦЕМІ52,5Н, классы В30-В70 ( $\rho=2389-2485$  кг/м<sup>3</sup>, W8-W20).

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущими ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетонов от В7,5 до В70 с наибольшими показателями водонепроницаемости.

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

На рисунке 2.24 показано влияние добавок с вяжущим ЦЕМІ52,5Н 1 и 2 на показатель водонепроницаемости образцов бетона, классы от В7,5 до В70.

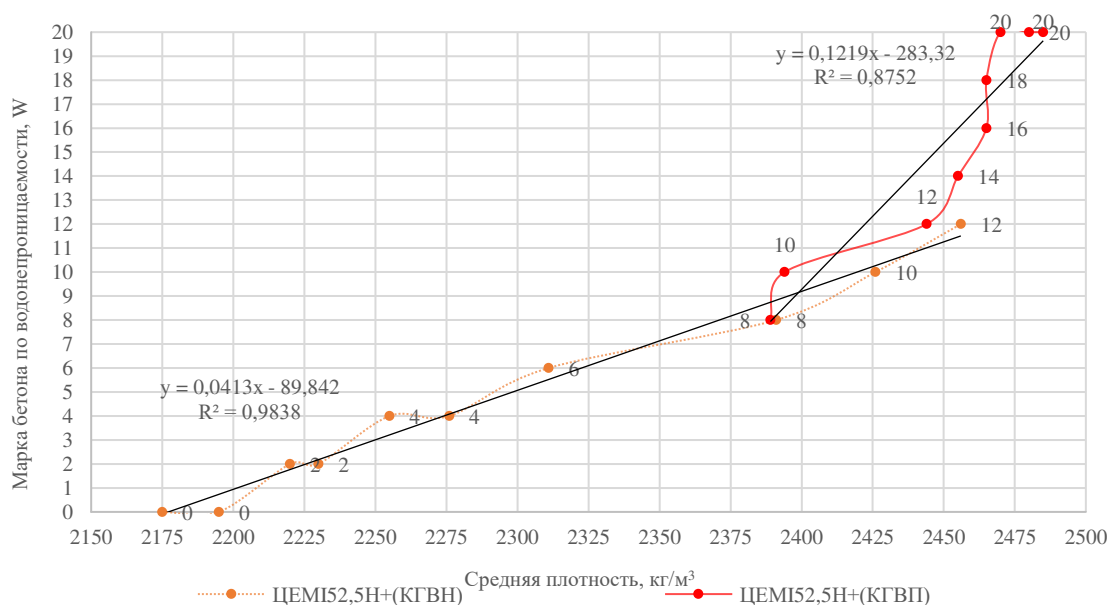


Рисунок 2.24 - Зависимости водонепроницаемости бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок.

Как видно из данных таблицы 2 Приложения Б и рисунка 2.24, увеличение плотности образцов бетона с применением добавок приводит к увеличению их сопротивления к проникающей воде. Применение добавки 1 в объеме от 1,1% до

1,4% позволяет получить бетоны классов В7,5-В40 со средним уровнем плотности от 2175 до 2456 кг/м<sup>3</sup> и показателем водонепроницаемости от W0 до W12. Применение добавки 2 в объёме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет получить образцы бетона классов В30-В70, достичь более высоких значений плотности от 2389 до 2485 кг/м<sup>3</sup> и показателя водонепроницаемости от W0 до W12.

*Анализ морозостойкости бетона при замораживании и оттаивании.* Определение марки по морозостойкости (F) составов бетона проведено на образцах-кубах размерами 100х100х100 мм<sup>3</sup> (рис. 2.25, 2.26) по методике ГОСТ 10060 [114]. Испытания – циклы замораживания и оттаивания, начинались с минимально допустимой по методу марки по морозостойкости (F<sub>175</sub>) и продолжались до определения фактической марки по морозостойкости. В таблице 3 Приложения Б приведены результаты определения марки по морозостойкости составов бетона.

На рисунках 2.27, 2.28 и в таблице 3 Приложения Б показано симбатное изменение водонепроницаемости, морозостойкости и плотности. Это происходит за счёт влияния 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 (пропорциональное) изменение позволяет произвести бетон с меньшим количеством дефектов. Как следствие, проникающая вода гигроскопического влагопоглощения бетона не может пройти глубже в микропоры и вызвать разрушение бетонной структуры образца при циклах замораживания и оттаивания [85, 94, 96-99, 115].

Зависимости на рисунках 2.27 а), б) показывают изменение морозостойкости бетона при замене мелкозернистого наполнителя. Образцы с применением добавки 1 обладают плотностью  $\rho=2176-2377$  кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемостью W0-W8.

На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с промытым карьерным и речным песком демонстрируют одинаковые результаты:

-  $\rho=2176-2216$  кг/м<sup>3</sup> (W0-W2, морозостойкость F0);

-  $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, морозостойкость F50-F150).

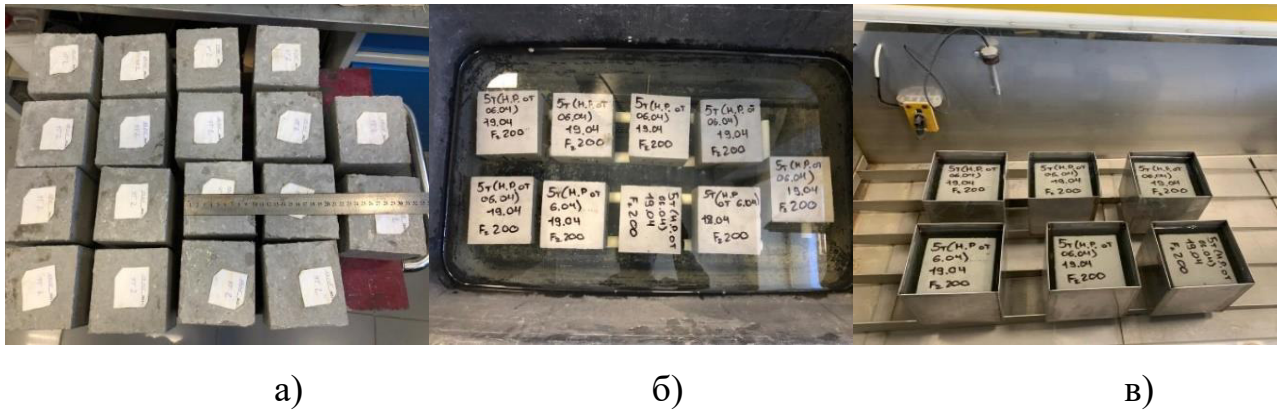


Рисунок 2.25 - Образцы бетона для определения морозостойкости: а) до испытания, б) замоченные в воде, в) погружённые в испытательную камеру

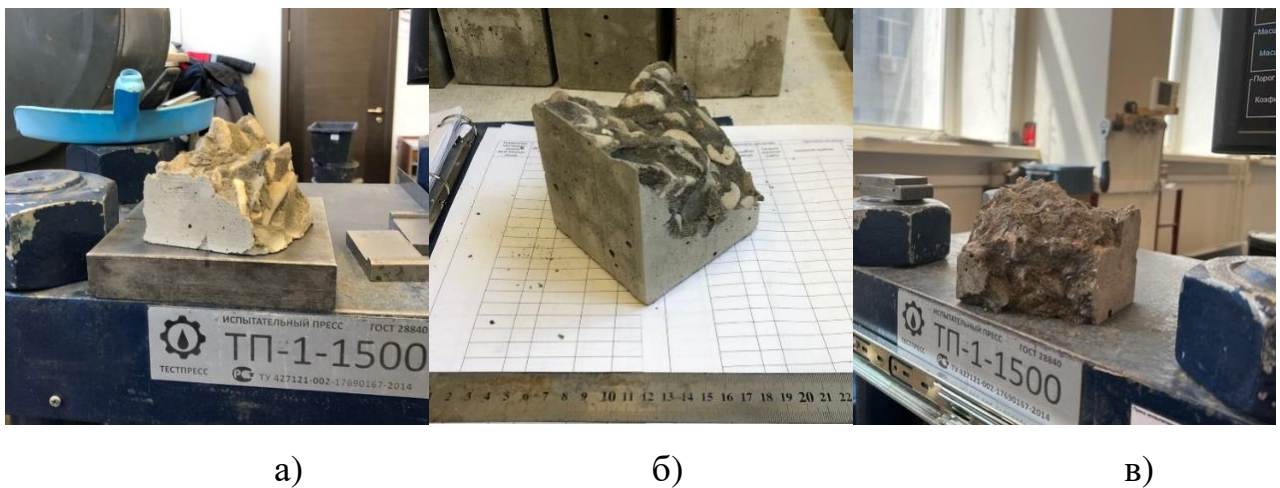


Рисунок 2.26 - Образцы бетона для определения морозостойкости: а) испытанный образец до замачивания, б) испытанный образец (крупный наполнитель щебень известняковый) после воздействий циклов замораживания и оттаивания, в) испытанный образец (крупный наполнитель щебень гранитный) после воздействий циклов замораживания и оттаивания.

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком:

-  $\rho=2176-2216 \text{ кг/м}^3$  (W0, морозостойкость F0);

-  $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, морозостойкость F50-F150).

Образцы с применением добавки 2 так же демонстрируют одинаковые результаты с промытым карьерным и речным песком.

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком демонстрируют одинаковые результаты, при плотности:



-  $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, морозостойкость F0);

-  $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, морозостойкость F50-F150).

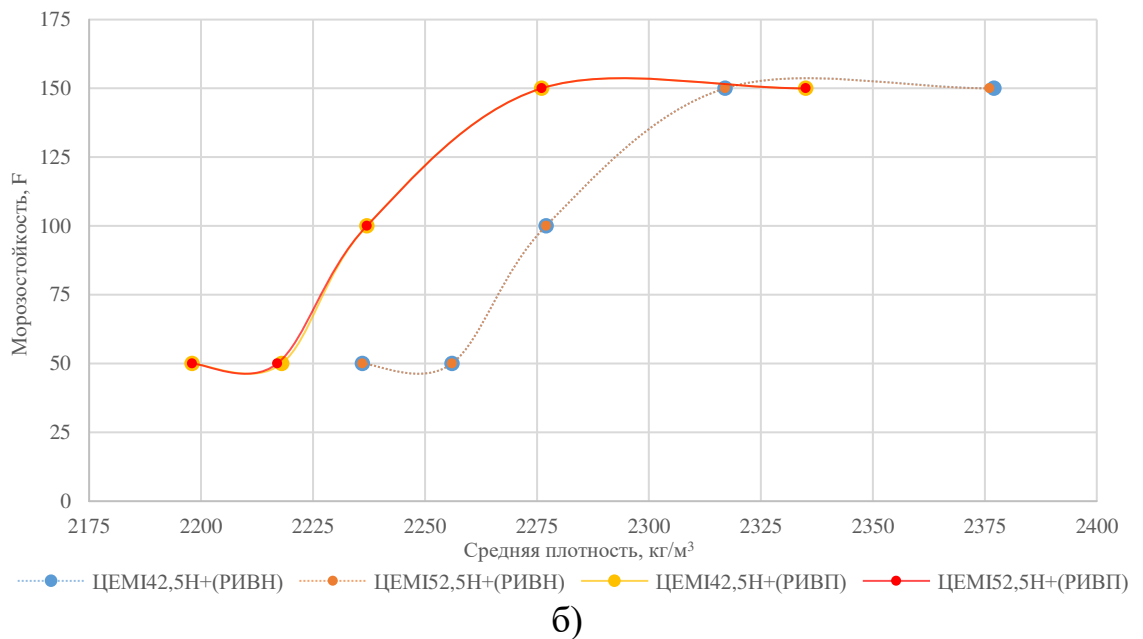
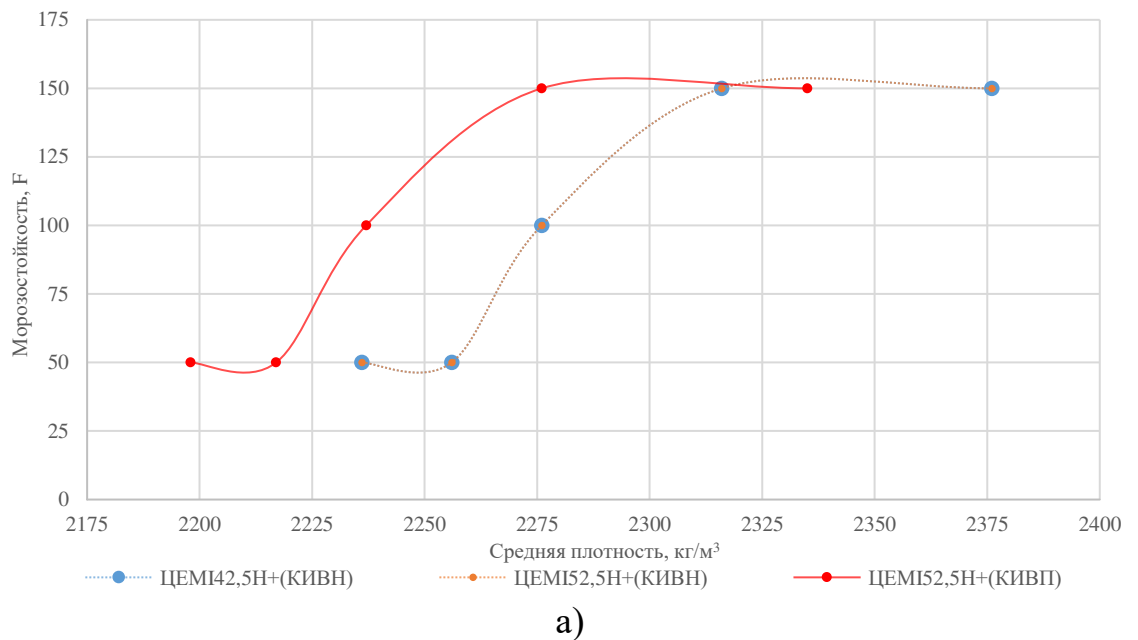


Рисунок 2.27 - Зависимости изменения морозостойкости от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н а) КИВН и КИВП, б) РИВН и РИВП

На вяжущем ЦЕМ I 42,5Н с речным песком образцы при плотности:

-  $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (W0, морозостойкость F0);

-  $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (W2-W8, морозостойкость F50-F150).

Зависимости на рисунках 2.28 а), б) иллюстрируют изменение морозостойкости бетона при замене крупнозернистого наполнителя на мелкозернистый. Образцы с добавкой 1 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с промытым карьерным и речным песком плотностью:

- $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (водонепроницаемость W0, морозостойкость F0),
- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150),
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F200-F300),
- $\rho=2206-2226 \text{ кг/м}^3$  (W0, F0),
- $\rho=2251-2331 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150),
- $\rho=2411-2467 \text{ кг/м}^3$  (W8-W12, F200-F300).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком: -  $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (водонепроницаемость W0, морозостойкость F0);

- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150);
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F200-F300);
- $\rho=2206-2226 \text{ кг/м}^3$  (W0, F0);
- $\rho=2251-2331 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150);
- $\rho=2411-2467 \text{ кг/м}^3$  (W8-W12, F200-F250).

Применение добавки 2 с карьерным песком позволило получить образцы с максимальными показателями морозостойкости F200-F600, на вяжущем ЦЕМІ42,5Н, с плотностью:

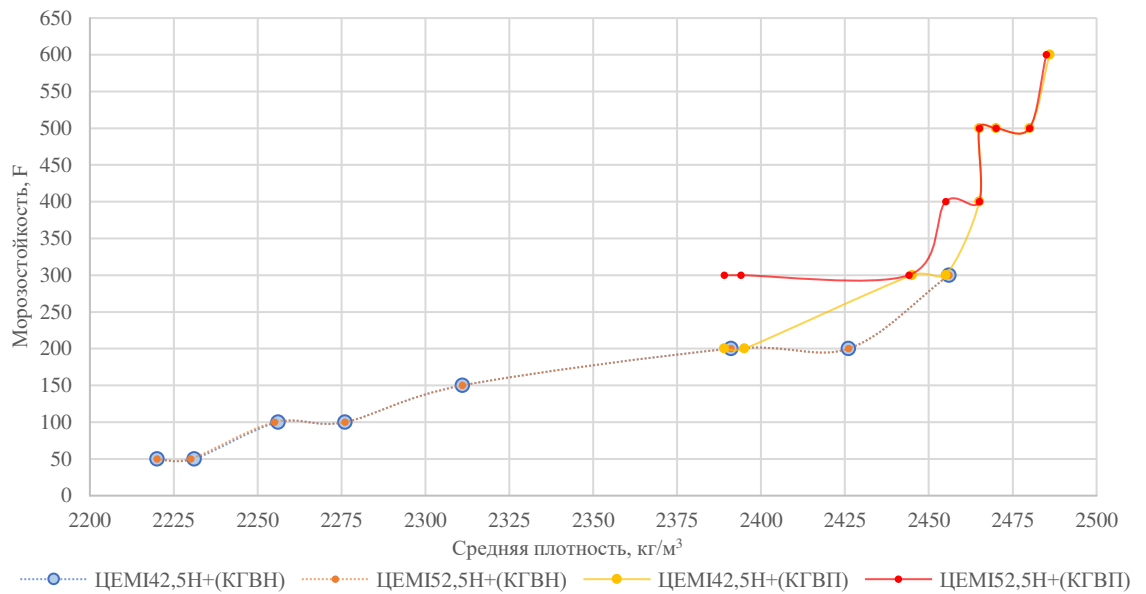
- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (W8-W14, F200-F400);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (W16-W20, F400-F500);
- $\rho=2486 \text{ кг/м}^3$  (W20, F600).

На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком:

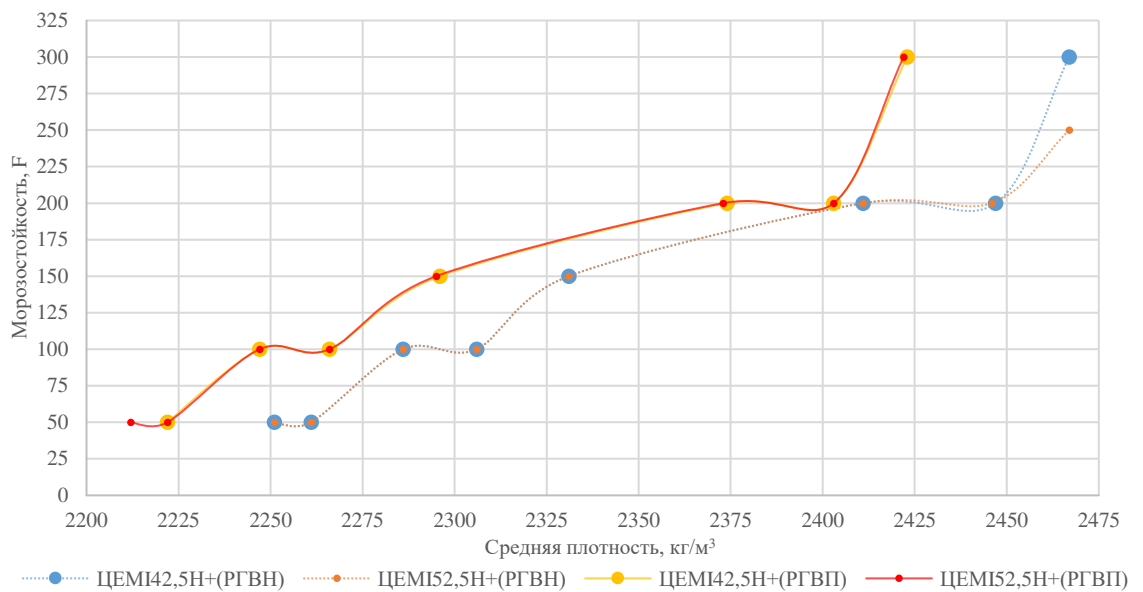
- $\rho=2169-2212 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, F0);
- $\rho=2222-2423 \text{ кг/м}^3$  (W2-W12, F50-F300).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным песком:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (W8-W14, F200-F400);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (W16-W20, F400-F500);
- $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$  (W20, F600).



а)



б)

Рисунок 2.28 - Зависимости изменения морозостойкости от плотности бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

На вяжущем ЦЕМ I 52,5Н с речным песком:

- $\rho=2169-2212 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, F0);
- $\rho=2222-2423 \text{ кг/м}^3$  (W2-W12, F50-F300).

Зависимости на рисунках 2.27 а), 2.28 а) и данные таблицы 2 Приложения Б показывают влияние известнякового и гранитного щебня на способность образцов

сохранять устойчивость при проникновении в них воды.

Известняковый щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов на вяжущем ЦЕМІ42,5Н плотностью:

- $\rho=2176-2216 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, F0);
- $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, F50-F150).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н получены образцы с параметрами:

- $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, F0);
- $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, F50-F150).

Образцы с гранитным щебнем, на вяжущем ЦЕМІ42,5Н имеют параметры:

- $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (W0, F0);
- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150);
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F200-F300).

Образцы на вяжущем ЦЕМІ52,5Н с плотностью:

- $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (W0, F0);
- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F50-F150);
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (W2-W6, F200-F300).

Известняковый щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов на вяжущем ЦЕМІ52,5Н с плотностью:

- $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (W0-W2, F0);
- $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (W2-W10, F50-F150).

Гранитный щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов на вяжущем ЦЕМІ52,5Н с плотностью:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (W8-W14, F200-F400);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (W16-W20, F400-F500);
- $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$  (W20, F600).

Образцы на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с плотностью:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (W8-W14, F200-F400),
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (W16-W20, F400- F500),
- $\rho=2486 \text{ кг/м}^3$  (W20, F600).

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

На рисунке 2.29 показано влияние добавок 1 и 2 с вяжущим ЦЕМІ52,5Н на показатель морозостойкости образцов бетона классов от В7,5 до В70.

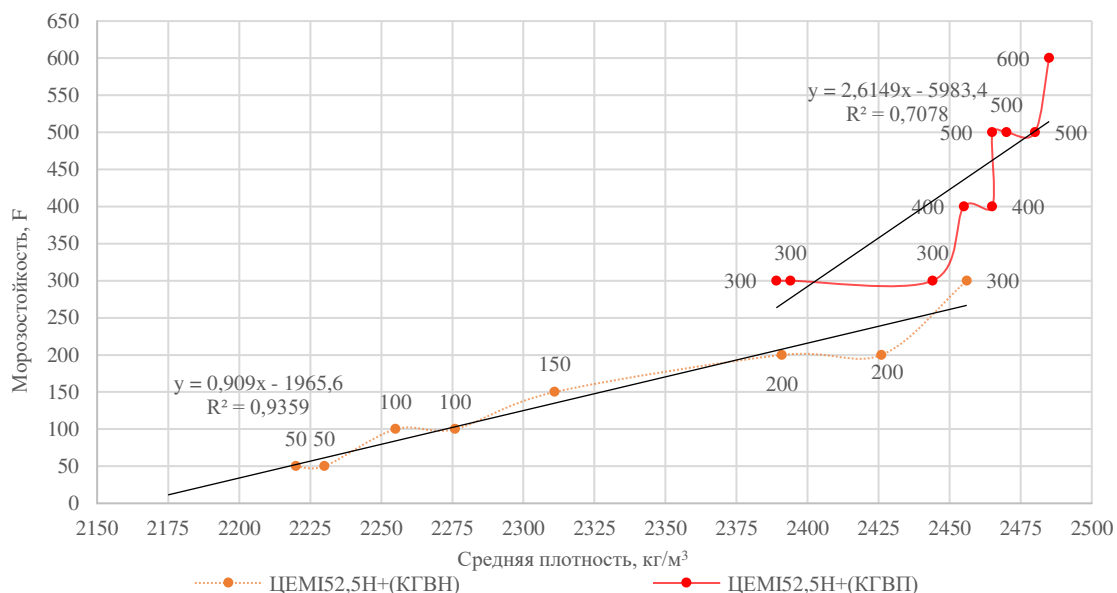


Рисунок 2.29 - Изменение морозостойкости бетона от плотности бетона на основе нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок.

Как видно из данных таблиц 2, 3 Приложение Б и рисунка 2.29, увеличение плотности образцов бетона с применением добавок 1, 2 приводит к симбатному (пропорциональному) увеличению водонепроницаемости и морозостойкости. Применение добавки 1 от 1,1% до 1,4% позволяет получить бетоны классов В7,5-В40 с показателями морозостойкости F50-F300 ( $\rho=2175-2456$  кг/м³, W0 до W12).

Применение добавки 2 в объёме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет получить образцы бетона классов В30-В70 с показателями морозостойкости F300-F600 ( $\rho=2389-2485$  кг/м³, W8 до W20).

*Оценка срока службы изолирующих бетонных конструкций в сульфатных средах.* Повышению качества и долговечности железобетонных конструкций уделяется большое внимание при строительстве объектов повышенной

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 захоронения РАО, планируемых к длительной эксплуатации в условиях агрессивного воздействия окружающей среды [104-106].

Большое количество экспериментальных работ проведено при оценке и анализе процессов коррозии бетона, железобетонных конструкций; основоположниками этих работ являются Е.А. Гузеев, Н.В. Савицкий и др. [116].

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 гидросульфоалюмината кальция), скорость коррозии со временем замедляется. В работе [117] представлена методика, в которой предложены количественные зависимости, оценивающие процесс коррозии и изменения физико-механических характеристик бетона. Процесс накопления  $\text{SO}_3^{2-}$  в данной методике описан уравнением [117]:

$$Q_{\text{SO}_3} = f(n_{\text{C}_3\text{A}}, n_{\text{C}_3\text{S}}, n_{\text{A}}, \Pi_0, C_{\text{HCO}_3}, K, y, \sigma, \tau) \quad (2.1)$$

Основные зависимости. Распределение связанных цементным камнем сульфат-ионов при одномерной диффузии описывается эмпирическими зависимостями [117]:

если  $Q_{\text{SO}_3}(Z = 0, \tau) < Q_{\text{SO}_3, \text{u}}$ :

$$Q_{\text{SO}_3}(Z, \tau) = Q_{\text{SO}_3}(Z = 0, \tau)[1 - Z/y(\tau)]^2 \text{ при } Z < y(\tau) \quad (2.2)$$

если  $Q_{\text{SO}_3}(Z, \tau) > Q_{\text{SO}_3, \text{u}}$ :

$$Q_{\text{SO}_3}(Z, \tau) \begin{cases} Q_{\text{SO}_3, \text{u}}, \text{ при } Z \leq y_2(\tau) \\ Q_{\text{SO}_3, \text{u}} \left[ 1 - \frac{Z - y_2(\tau)}{y(\tau)} \right], \text{ при } y_2(\tau) < Z < y(\tau) + y_2(\tau) \end{cases} \quad (2.3)$$

где в зависимости (2.2) и (2.3)  $Q_{\text{SO}_3}(Z = 0, \tau)$ , – количество связанных цементным камнем сульфат-ионов в краевом (поверхностном) слое;  $Z$  – секущая координата, отсчитываемая от краевого слоя;  $\tau$  – продолжительность воздействия раствора

сульфатов;  $y(\tau)$  – ширина фронта взаимодействия, исключая разрушенные слои;  $Q_{SO_3,u}$  – предельное количество  $SO_3$ , при котором бетон полностью теряет прочность ( $\approx 13,7\%$ );  $y_2(\tau)$  – глубина разрушения слоёв.

Параметры  $Q_{SO_3}(Z = 0, \tau)$ ,  $y(\tau)$ ,  $y_2(\tau)$  определяются по следующим зависимостям [117]:

$$Q_{SO_3}(Z = 0, \tau) = k_q C_{SO_4} \Pi_{i=1}^3 \eta_i (\alpha \tau)^{0,5} \quad (2.4)$$

$$\text{где } \Pi_{i=1}^3 \eta_i = \eta_K \eta_B \eta_C \quad (2.5)$$

$$y(\tau) = \begin{cases} K_Z C_{SO_4}^{0,5} \Pi_{i=1}^5 \eta_i (\alpha \tau)^{0,28}, & \text{при } Q_{SO_3}(Z = 0, \tau) \leq Q_{SO_3,u} \\ K_Z C_S^{0,5} \Pi_{i=1}^5 \eta_i (\alpha T_{ch,2})^{0,28}, & \text{при } Q_{SO_3}(Z = 0, \tau) > Q_{SO_3,u} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{где } \Pi_{i=1}^3 \eta_i = \eta_K \eta_B \eta_C \eta_\sigma \eta_W \quad (2.7)$$

$$y_2(\tau) = K_Z C_S^{0,5} \Pi_{i=1}^5 \eta_i [(\alpha \tau)^{0,28} (\alpha T_{ch,2})^{0,28}] \quad (2.8)$$

где  $T_{ch,2}$  – продолжительность воздействия  $SO_4$  до начала разрушения поверхностного слоя ( $Z=0$ ) определяется по формуле:

$$T_{ch,2} = \left[ \frac{Q_{SO_3,u}}{k_q C_S^{0,5} \Pi_{i=1}^5 \eta_i} \right]^2 \alpha^{-1} \quad (2.9)$$

где в зависимостях (2.4)-(2.9)  $k_q, k_Z$  – константы, характеризующие режим воздействия среды; при постоянном погружении  $k_q = 0,05 \text{ (л/мг)}^{0,5}$ ;  $k_Z = 0,02 \text{ см(л/мг)}^{0,5}$ ;  $C_{SO_4}$  – концентрация  $SO_4$ , мг/л;  $\eta_i$  – коэффициенты, учитывающие влияние факторов на процесс развития сульфатной коррозии, определяются по следующим зависимостям [117]:

$$C_3A = 0,322 \exp(0,162 n_{C_3A}), \quad (2.10)$$

$$C_3S = 0,027 n_{C_3S} - 0,338, \quad (2.11)$$

$$\eta_A = \exp(-K_A \Pi_A), \quad (2.12)$$

$K_A = 0,014$  – для активных минеральных добавок;

$$\eta_W = -0,349 + 0,035 W_{CO}, \quad (2.13)$$

$$W_{CO} = \frac{90(W/C - 0,23 \alpha_{max})}{0,32 + W/C}$$

$$\alpha_{max} = 2,38 W/C \leq 1$$

$$\eta_B = \begin{cases} \exp(-0,309C_{HCO_3}), \text{ при } 0 < C_B \leq 5,5 \text{ (мг-экв)/л} \\ 0,183, \text{ при } C_B > 12 \text{ (мг-экв)/л} \end{cases}, \quad (2.14)$$

$$\eta_\sigma = \begin{cases} 1 - 0,507, \eta_{Bt} \\ 1 - 0,173, \eta_{cre} \end{cases}, \quad (2.15)$$

$$0,827 \exp \left[ 0,272 \left( \frac{\eta_{cre}-1}{\alpha-1} \right) \right],$$

$$\alpha = \frac{R_B}{R_{cre}^0}, \eta_{Bt} = \frac{\sigma}{R_{Bt}}, \alpha = \frac{R_B}{R_{cre}^0}, \eta_{cre} = \frac{\sigma}{R_{cre}^0};$$

где в формулах (2.10)-(2.15)  $\eta_{C_3A}, \eta_{C_3S}, \eta_A, \eta_W, \eta_R, \eta_\sigma$  – содержание  $C_3A, C_3S$ , активных добавок, проницаемости, бикарбонатной щелочности, влияния напряжённого состояния на скорость развития процесса сульфатной коррозии;  $n_{C_3A}, n_{C_3S}, n_A$  – содержание  $C_3A, C_3S$ , активных добавок в цементе;  $W_{CO}$  – открытая пористость в единице объёма цементного камня, %;  $W/C$  – водоцементное отношение;  $C_{HCO_3}$  – концентрация  $HCO_3$ , (мг-экв)/л;  $R_B, R_{cre}^0, R_{Bt}$  – предел прочности бетона на сжатие, нижний параметрический уровень микротрещинообразования, предел прочности бетона на растяжение;  $\Sigma$  – напряжение;  $\alpha$  – размерный коэффициент, год<sup>-1</sup>.

Продолжительность воздействия сульфат-ионов до разрушения слоя определённой глубины ( $h_z$ ) определяется по формуле [117]:

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{h_z}{K_Z K_Z C_S^{0,5} \prod_{i=1}^5 \eta_i} + (\alpha T_{ch,2})^{0,28} \right]^{3,57}, \quad (2.16)$$

Данная методика позволяет прогнозировать скорость коррозионных разрушений бетона только при постоянном воздействии среды определённой концентрации в условиях полного погружения конструкции 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.

Рекомендации предназначены для использования в научно-исследовательских институтах и строительных лабораториях при проведении исследований процессов коррозии бетона в различных агрессивных средах, в



широком диапазоне концентраций, а также для изучения различных факторов, оказывающих влияние на эти процессы [118].

Расчет количества цементного камня (в пересчете на СаО), вошедшего в химическое взаимодействие с жидкой средой или перешедшего в раствор  $P_{CaO}$  (за период испытания), при объемных методах анализа катионов или анионов, выбранных в качестве критерия скорости коррозии, производится по формуле [118]:

$$P_{CaO} = \frac{(q_1 - q_2) M f_{эКВ}(CaO) \cdot 0,05608 Q}{S q_3}, \quad (2.17)$$

где  $q_1$  - объем стандартного раствора с точно известной концентрацией химически активного вещества, пошедшего на титрование исходного раствора до испытания,  $см^3$ ;  $q_2$  - объем стандартного раствора с точно известной концентрацией химически активного вещества, пошедшего на титрование исходного раствора после взаимодействия с цементным камнем или бетоном,  $см^3$ ;  $M$  - молярность раствора;  $f_{эКВ}$  ( $CaO = 1/2$ ); 0,05608 - молярная масса СаО, соответствующая 1  $см^3$  точно 1 моли раствора химически активного вещества;

$Q$  - объем раствора, участвовавшего во взаимодействии с образцом,  $см^3$ ;

$S$  - площадь незащищенной поверхности,  $см^2$ ;  $q_3$  - объем раствора, отобранного на титрование,  $см^3$ .

Степень коррозионного разрушения бетона определяют суммированием  $P_{CaO, SO_4}$  за каждый период испытаний [118]:

$$\sum P_{CaO} = P_{1CaO} + P_{2CaO} + P_{3CaO} + \dots + P_{nCaO}, \quad (2.18)$$

$$\sum P_{SO_4} = P_{1SO_4} + P_{2SO_4} + P_{3SO_4} + \dots + P_{nSO_4}, \quad (2.19)$$

Расчет глубины разрушения  $\Gamma_p$  цементного камня, бетона к моменту окончания исследований скорости коррозии производится по формуле:

$$\Gamma_p = \frac{\sum P_{CaO}}{Ц\beta}, \quad (2.20)$$

где:  $\sum P_{CaO}$  - количество прореагировавшего цементного камня в пересчете на СаО, отнесенное к единице площади реагирующей поверхности образцов, определяется экспериментально;  $Ц$  - количество цемента в 1  $см^3$  исследуемых образцов,

рассчитывается по фактическому составу образцов, г/см<sup>3</sup>;  $\beta$  – содержание СаО в цементе, определяемое по результатам химического анализа цемента, %.

Расчет долговечности бетона в сульфатных средах может быть выполнен, исходя из теоретических закономерностей кинетики гетерогенных процессов, развивающих уравнение Таммана - зависимость интенсивности коррозии от времени взаимодействия агрессивного раствора с бетоном и концентрации агрессивного раствора (т.е. при воздействии критического содержания сульфат-иона в образцах бетона, образовавшегося в условиях полного погружения в среду (раствор) с постоянной концентрацией, приводящей к его разрушению) [118]:

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} = \frac{Q}{\sum P_{SO_3}}, \tau_0 = \left( \frac{Q}{\sum P_{SO_3}} \right)^2 \tau \quad (2.21)$$

где:  $\tau_0$  - возможный срок эксплуатации бетона, конструкций, лет;

$\tau$  - продолжительность исследований, лет;  $Q$  - разрушающее количество сульфатов по  $SO_3$ , % от массы цемента;  $\sum P_{SO_3}$  - количество сульфатов, накопившихся в образцах за время исследований (% массы цемента). Количество сульфатов  $Q$ , которое вызывает разрушение бетона в зависимости от типа цемента (сульфатостойкий портландцемент ( $C_3A$  не более 5 %) - 12%; среднеалюминатный портландцемент ( $C_3A$  не более 7 %) – 9%; высокоалюминатный портландцемент ( $C_3A$  не более 7 %) – 6%).

По ускоренным испытаниям в сульфатной среде высокой концентрации можно рассчитать количество сульфатов  $\sum P_{SO_3}$ , накопившихся в образцах для данной концентрации агрессивной среды [118]:

$$\sum P_{SO_3} = \sqrt{\frac{C}{C_0}} P_{0SO_3} \quad (2.22)$$

где  $P_{0SO_3}$  - количество сульфатов, накопившихся в образцах за время испытаний в сульфатной среде заданной концентрации, % массы цемента;  $C_0$  и  $C$  - экспериментальная концентрация сульфатной агрессивной среды и фактическая концентрация сульфатной среды, для которой необходимо выполнить прогноз разрушения бетона, моль/л.

*Расчёт сроков службы геотехнологического полимера в сульфатных 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 с использованием изложенного материала на образцах-кубах размерами 100x100x100 мм<sup>3</sup> в соответствии с ГОСТ 27677-88 [119], расчёт срока разрушения образцов бетонов в сульфатных средах проведен в соответствии с рекомендациями по методам определения коррозионной стойкости бетона [117].

Результаты исследований влияния сульфатной коррозии, представленные в таблице 2.15, 4 приложения Б и графиках рисунков 2.30, 2.31, отражают длительность коррозии, протекающей в бетоне различных классов прочности. В соответствии с химическим анализом грунтовых вод, содержание солей сульфатов на территории потенциального размещения ППЗРО не превышает 500 мг/л [45].

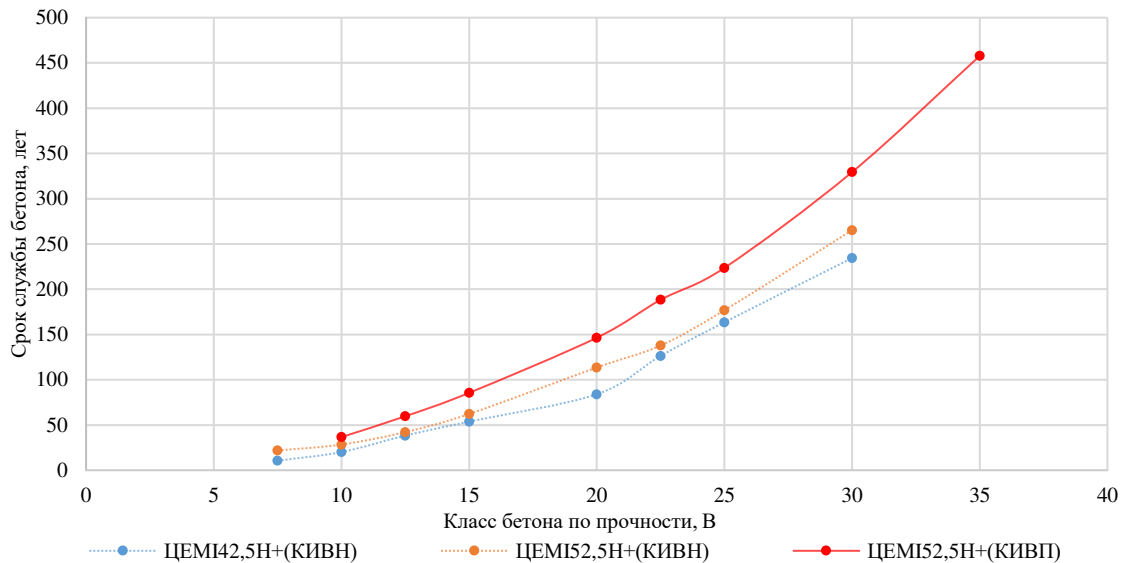
На рисунках 2.30, 2.31 и в таблицах 2, 3, 4 Приложения Б, представлено изменение водонепроницаемости, морозостойкости, плотности и их влияния на количество поглощённых сульфатов в образцах бетонов (класс бетона по оси абсцисс используется как интегральный показатель), и как следствие, срок коррозионного разрушения бетонного камня в агрессивной сульфатной среде (таблица 2.14), имитирующей условия эксплуатации ППЗРО. Снижение показателя водопоглощения с увеличением плотности, водонепроницаемости, морозостойкости приводит к уменьшению количества сульфатов, поглощённых растворной частью бетона в образцах, и как следствие, увеличению срока службы бетона в сульфатных средах.

На рисунках 2.30 а), б) показаны зависимости изменения срока коррозионного разрушения бетонных образцов при замене мелкозернистого наполнителя. Крупнозернистый наполнитель – известняковый щебень.

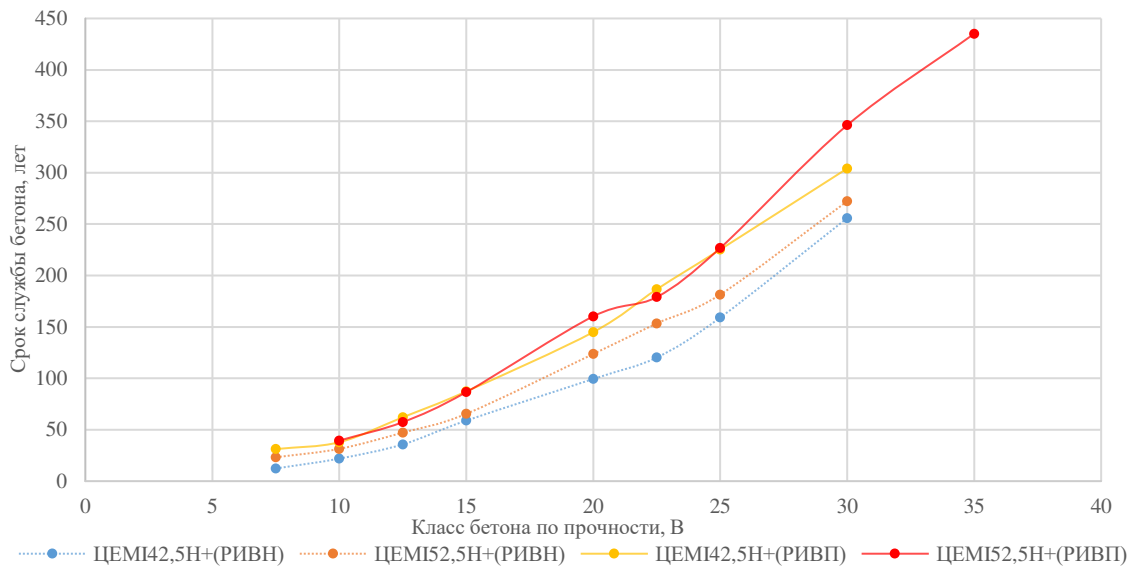
С применением добавки 1 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н, с промытым карьерным и речным песком получены классы В7,5-В30 с плотностью:

-  $\rho=2176-2216$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=11-38$  лет);

- $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=54-234$  года);
- $\rho=2176-2216 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=12-36$  лет);
- $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=59-256$  лет).



а)



б)

Рисунок 2.30 - Зависимости срока службы бетона (сульфатной коррозии бетона) от класса бетона 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.

С применением добавки 1, на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н с промытым карьерным и речным песком, получены классы В7,5-В30 с  $\rho=2176-2216 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы

бетона  $\tau=22-42$  лет) и  $\rho=2236-2376$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=62-265$  лет).

С применением добавки 2 на вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным и речным песком соответствуют классам:

- В10-В35  $\rho=2139-2178$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=37-85$  лет) и  $\rho=2198-2335$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=146-458$  лет);
- В7,5-В30  $\rho=2139-2178$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=39-87$  лет) и  $\rho=2198-2335$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=160-435$  лет).

С применением добавки 2 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком образцы демонстрируют классы В7,5-В30  $\rho=2139-2178$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=31-62$  лет) и  $\rho=2198-2335$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=87-304$  года).

На рисунках 2.31 а), б) показано изменение срока службы образцов бетона при замене крупнозернистого известнякового наполнителя на гранитный. Образцы с добавкой 1 на вяжущем ЦЕМІ42,5Н с промытым карьерным соответствуют бетону классов В7,5-В40:

- $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=17-33$  года);
- $\rho=2220-2311$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=46-182$  года);
- $\rho=2391-2456$  кг/м<sup>3</sup> (F200-F300 срок службы бетона  $\tau=291-548$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком соответствуют бетону классов В7,5-В40:

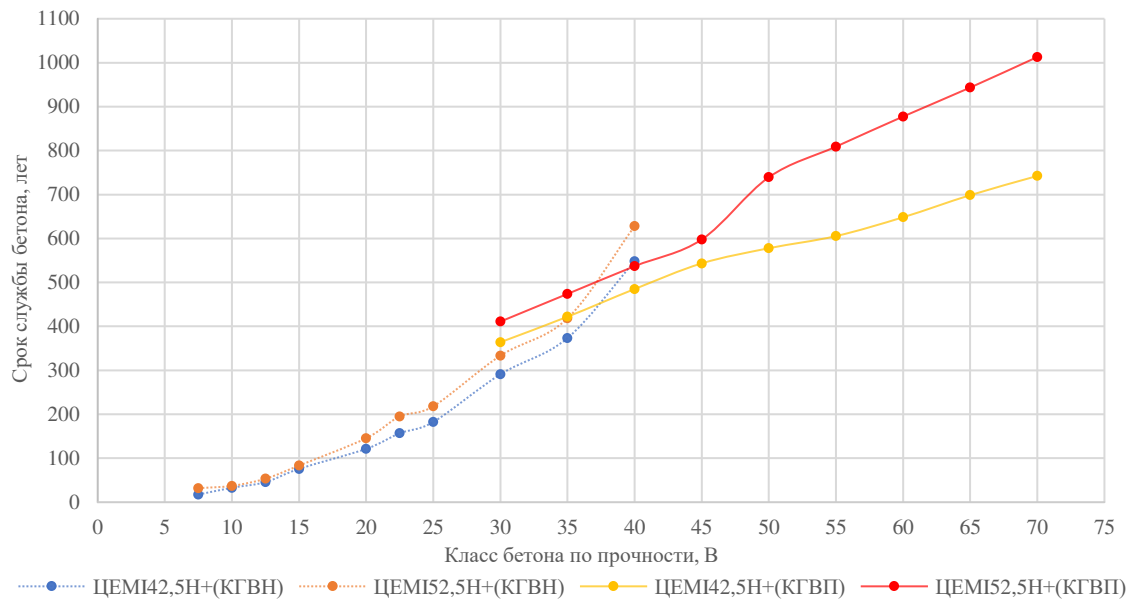
- $\rho=2206-2226$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=24-31$  год);
- $\rho=2251-2331$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=49-192$  года);
- $\rho=2411-2467$  кг/м<sup>3</sup> (F200-F300, срок службы бетона  $\tau=270-479$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным песком соответствуют классам бетона В7,5-В40:

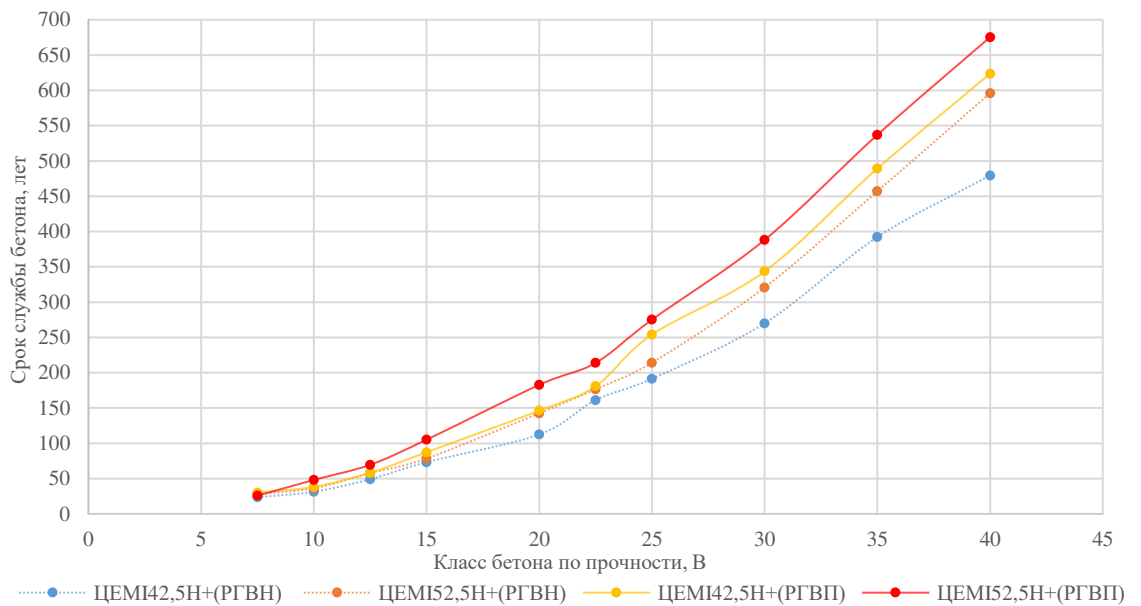
- $\rho=2176-2196$  кг/м<sup>3</sup> (F0, срок службы бетона  $\tau=32-37$  лет);
- $\rho=2220-2311$  кг/м<sup>3</sup> (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=53-218$  лет);
- $\rho=2391-2456$  кг/м<sup>3</sup> (F200-F300, срок службы бетона  $\tau=333-628$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с речным песком соответствуют классам бетона В7,5-В40:

- $\rho=2206-2226 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=28-36$  лет);
- $\rho=2251-2331 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=58-214$  лет);
- $\rho=2411-2467 \text{ кг/м}^3$  (F200-F250, срок службы бетона  $\tau=321-596$  лет).



а)



б)

Рисунок 2.31 - Зависимости срока службы бетона (сульфатной коррозии бетона) от класса бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок. Составы с вяжущим марок ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ I 52,5Н в) КГВН и КГВП, г) РГВН и РГВП.

Применение добавки 2 с карьерным песком позволило получить образцы с максимально длительным сроком службы бетона в сульфатных средах. На вяжущем ЦЕМІ42,5Н получены образцы классов В30-В70:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (F200-F430, срок службы бетона  $\tau=364-543$  лет);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (F400-F500, срок службы бетона  $\tau=578-699$  лет);
- $\rho=2486 \text{ кг/м}^3$  (F600, срок службы бетона  $\tau=742$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ42,5Н с речным песком классов В7,5-В40 с  $\rho=2169-2212 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=30-58$  лет) и  $\rho=2222-2423 \text{ кг/м}^3$  (F50-F300, срок службы бетона  $\tau=87-624$  года).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с промытым карьерным песком образцы соответствуют классам В30-В70:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (F200-F400, срок службы бетона  $\tau=411-598$  лет);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (F400-F500, срок службы бетона  $\tau=739-943$  года);
- $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$  (F600, срок службы бетона  $\tau=1013$  лет);

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с речным песком соответствует классам В7,5-В40 с  $\rho=2169-2212 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=26-70$  лет) и  $\rho=2222-2423 \text{ кг/м}^3$  (F50-F300, срок службы бетона  $\tau=105-675$  лет).

На рисунках 2.30 а), 2.31 а) показано влияние известнякового и гранитного щебня на срок службы в агрессивной среде. Известняковый щебень с добавкой 1 обеспечивает получение образцов классов В7,5-В30 на ЦЕМІ42,5Н с  $\rho=2176-2216 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=11-38$  лет) и  $\rho=2236-2376 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=54-234$  года).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н образцы классов В10-В35 с  $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=37-85$  лет) и  $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=146-458$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н с гранитным щебнем образцы классов В7,5-В40 на ЦЕМІ42,5Н с:

- $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=17-33$  года);
- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=46-182$  года);
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (F200-F300, срок службы бетона  $\tau=291-548$  лет).

На вяжущем ЦЕМІ52,5Н бетон с классами В7,5-В40:

- $\rho=2176-2196 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=32-37$  лет);
- $\rho=2220-2311 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=53-218$  лет);
- $\rho=2391-2456 \text{ кг/м}^3$  (F200-F300, срок службы бетона  $\tau=333-628$  лет).

Известняковый щебень с добавкой 2 обеспечивает получение образцов классов В10-В35 на вяжущем ЦЕМІ52,5Н с  $\rho=2139-2178 \text{ кг/м}^3$  (F0, срок службы бетона  $\tau=37-85$  лет) и  $\rho=2198-2335 \text{ кг/м}^3$  (F50-F150, срок службы бетона  $\tau=146-458$  лет).

С гранитным щебнем на вяжущем ЦЕМІ52,5Н В30-В70 с:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (F200-F400, срок службы бетона  $\tau=411-598$  лет);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (F400-F500, срок службы бетона  $\tau=739-943$  лет);
- $\rho=2485 \text{ кг/м}^3$  (F600, срок службы бетона  $\tau=1013$  года).

С гранитным щебнем на вяжущем ЦЕМІ42,5Н бетон классов В30-В70 с:

- $\rho=2389-2455 \text{ кг/м}^3$  (F200-F430, срок службы бетона  $\tau=364-543$  года);
- $\rho=2465-2480 \text{ кг/м}^3$  (F400-F500, срок службы бетона  $\tau=578-699$  года);
- $\rho=2486 \text{ кг/м}^3$  (F600, срок службы бетона  $\tau=742$  года).

Применение гранитного щебня в комбинации с карьерным песком, вяжущими ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, добавками 1 и 2 обеспечивает получение бетонов классов от В7,5 до В70. Максимальный срок коррозионного разрушения 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.

Наиболее явные показатели срока службы бетона с использованием добавок 1 и 2, известняковым и гранитным крупным наполнителями приведены в таблицах 2.10 и 2.11.

На рисунке 2.32 показано влияние увеличения класса бетона на основе добавок 1 и 2 на срок коррозионного разрушения образцов бетона. Как видно из данных таблиц 2.14, 4 Приложения Б и рисунка 2.32, увеличение плотности образцов бетона с применением добавок 1,2 приводит к увеличению морозостойкости и срока службы бетона в агрессивных средах. Применение добавки 1 в объеме от 1,1% до 1,4% позволяет получить бетоны классов В7,5-В40



( $\rho=2175-2456$  кг/м<sup>3</sup>) с показателями морозостойкости F50-F300 и сроком службы бетона в агрессивной среде до полного разрушения ( $\tau$ ) от 32 до 628 лет. Применение добавки 2 в объеме 0,4%-0,6% от массы цемента позволяет получить образцы бетона классов В30-В70 ( $\rho=2389-2485$  кг/м<sup>3</sup>) с показателями морозостойкости F300-F600 и сроком службы бетона в агрессивной среде до полного разрушения ( $\tau$ ) от 411 до 1013 лет.

Таблица 2.10. Срок службы бетона (до полного разрушения) с использованием добавок 1 и 2, известняковым крупным наполнителем.

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0.4-0.6%)	
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau$ , лет	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau$ , лет
ЦЕМІ42,5Н с карьерным песком	2176-2216	11-38	-	-
ЦЕМІ42,5Н с речным песком	2236-2377	59-256	2198-2335	87-304
ЦЕМІ52,5Н с карьерным песком	2176-2196	22-28	2139-2178	37-85
	2216-2316	42-177	2198-2335	146-458
ЦЕМІ52,5Н с речным песком	2317-2377	181-272	2139-2178	39-88
			2198-2335	160-435

Таблица 2.11. Срок службы бетона (до полного разрушения) с использованием добавок 1 и 2, гранитным крупным наполнителем

Наименование	Добавка 1 (1,1-1,4%)		Добавка 2 (0.4-0.6%)	
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau$ , лет	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau$ , 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

Динамика изменения стойкости образцов бетонов к сульфатным средам (раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с концентрацией ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 500 мг/л) характеризуется замедлением процессов коррозии бетона симбатно с увеличением плотности, водонепроницаемости и морозостойкости. Некоторые результаты испытаний бетонов с добавками 1 и 2 приведены в сводных таблицах 2.12 и 2.13.

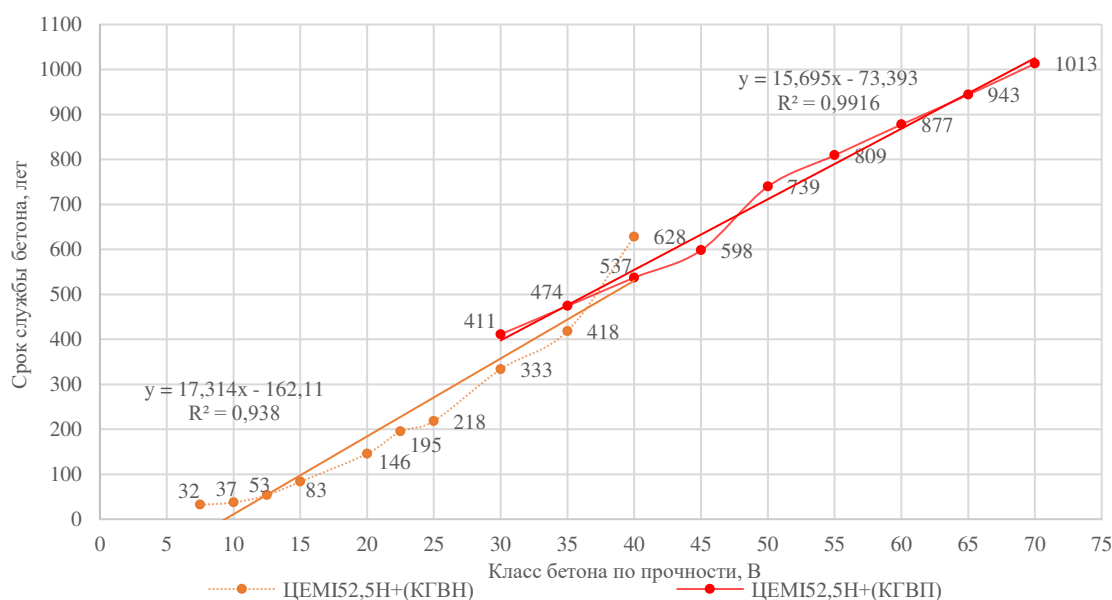


Рисунок 2.32 - Зависимости срока службы бетона (сульфатной коррозии бетона) от класса бетона на основе нафталинсульфатной и поликарбоксилатной добавок.

Таблица 2.12. Динамика изменения стойкости к сульфатным средам образцов бетонов (до полного разрушения) с использованием добавки 1.

Наименование	Водо-поглощение	Водонепроницаемость	Морозо-стойкость	Срок службы
	Wo, %	W, ед.	F, ед.	(τ), лет
ЦЕМ I 42,5Н+КИВН	15,2-8,6	0-8	50-150	11-234
ЦЕМ I 42,5Н+РИВН	15,4-8,7	0-8	50-150	12-256
ЦЕМ I 42,5Н+РГВН	14,2-3,5	0-12	50-300	24-479
ЦЕМ I 42,5Н+КГВН	14,3-3,4	0-12	50-300	17-548
ЦЕМ I 52,5Н+КИВН	15,2-8,8	0-8	50-150	22-265
ЦЕМ I 52,5Н+РИВН	15,4-8,7	0-8	50-150	23-272
ЦЕМ I 52,5Н+РГВН	15,4-3,4	0-12	50-250	28-596
<b>ЦЕМ I 52,5Н+КГВН</b>	<b>14,8-3,5</b>	<b>0-12</b>	<b>50-300</b>	<b>32-628</b>

Таблица 2.13. Динамика изменения стойкости к сульфатным средам образцов бетонов (до полного разрушения) с использованием добавки 2.

Наименование	Водо-поглощение	Водонепроницаемость	Морозо-стойкость	Срок службы
	Wo, %	W, ед.	F, ед.	(τ), лет
ЦЕМ I 42,5Н+КИВП	-	-	-	-
ЦЕМ I 42,5Н+РИВП	15,4-8,6	0-8	50-150	31-304
ЦЕМ I 42,5Н+РГВП	14,1-3,4	0-12	50-300	30-624
ЦЕМ I 42,5Н+КГВП	6,5-1	8-20	200-600	364-742
ЦЕМ I 52,5Н+КИВП	14,1-4,5	0-10	50-150	37-458
ЦЕМ I 52,5Н+РИВП	14,3-5	0-10	50-150	39-435
ЦЕМ I 52,5Н+РГВП	14-3,2	0-12	50-300	26-675
<b>ЦЕМ I 52,5Н+КГВП</b>	<b>6,4-0,8</b>	<b>8-20</b>	<b>300-600</b>	<b>411-1013</b>

Лабораторные эксперименты по определению срока службы бетона проведены при использовании растворов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с различными концентрациями ионов кислотного остатка  $\text{SO}_4^{2-}$ .

В таблице 2.14 приведены данные по сроку службы бетона ( $\tau$ ), в растворах  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с концентрациями ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  - 500 и 5000 мг/л. При этом видна значительная разница в сроках службы бетона в зависимости от концентрации ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . Для бетона с вяжущим ЦЕМ I 42,5Н, составом РГВН, добавкой 1 разница в сроках службы составит  $479 - 49 = 430$  лет, для состава РГВП разница в сроках службы составит  $624 - 64 = 560$  лет.

Для бетона с вяжущим ЦЕМ I 52,5Н, составом КГВН, добавкой 1 разница в сроках службы составит  $628 - 64 = 564$  года, для состава КГВП разница в сроках службы составит  $1013 - 97 = 916$  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.

В результате выполненного объема исследований получено, что образцы, изготовленные на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н с добавкой 2 обладают более высокими физико-механическими характеристиками по сравнению с ЦЕМ I 42,5Н, динамика изменения физико-механических характеристик имеет стабильную зависимость влияния крупно -и мелкозернистых наполнителей в составе образцов.

Некоторые итоговые результаты испытаний бетонов с добавками 1 и 2 приведены в сводных таблицах 2.15 и 2.16.

Водонепроницаемость, водопоглощение, морозостойкость являются факторами, оказывающими влияние на стойкость образцов бетонов к сульфатным средам. Пористые образцы более эффективно насыщаются водными растворами, и, как следствие, при циклах замораживания и оттаивания подвергаются большему разрушению.

Таблица 2.14. Срок службы бетона ( $\tau$ ) в растворах  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с концентрацией ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  500 и 5000 мг/л до полного разрушения (в условиях полного погружения образцов в среде с постоянной концентрацией).

Состав	Срок службы бетона ( $\tau$ ), лет в растворах $\text{Na}_2\text{SO}_4$ с концентрацией иону $\text{SO}_4^{2-}$ , мг/л															
	500	5000	500	5000	500	5000	500	5000	500	5000	500	5000	500	5000	500	5000
	ЦЕМІ42,5Н+								ЦЕМІ52,5Н+							
	КИВН		РИВН		КГВН		РГВН		КИВН		РИВН		КГВН		РГВН	
1	11	1	12	1	17	2	24	2	22	2	23	2	32	3	28	3
2	20	2	22	26	33	3	31	3	28	3	31	3	37	4	36	4
3	38	4	36	4	46	5	49	5	42	4	47	5	53	5	58	6
4	54	6	59	6	76	8	73	8	62	6	65	7	83	5	79	8
5	84	9	99	10	121	12	113	12	114	12	124	13	146	15	143	15
6	126	13	120	12	157	16	161	17	138	14	153	16	195	20	177	18
7	163	17	159	16	182	19	192	20	177	18	181	19	218	22	214	22
8	<b>234</b>	<b>24</b>	<b>256</b>	<b>26</b>	291	30	270	28	<b>265</b>	<b>27</b>	<b>272</b>	<b>28</b>	333	34	321	33
9	-	-	-	-	373	38	392	40	-	-	-	-	418	43	457	47
10	-	-	-	-	<b>548</b>	<b>56</b>	<b>479</b>	<b>49</b>	-	-	-	-	<b>628</b>	<b>64</b>	<b>596</b>	<b>61</b>
	КИВП		РИВП		КГВП		РГВП		КИВП		РИВП		КГВП		РГВП	
1	-	-	31	3	364	37	30	3	37	4	39	4	411	43	26	3
2	-	-	38	4	422	43	38	4	60	6	57	6	474	47	48	5
3	-	-	62	6	485	48	58	6	85	9	88	9	537	56	70	7
4	-	-	87	9	543	55	87	9	146	15	160	16	598	57	105	11
5	-	-	145	15	578	58	146	15	188	19	179	18	739	71	183	19
6	-	-	187	19	605	61	181	19	224	23	227	23	809	77	214	22
7	-	-	225	23	648	65	254	26	329	34	346	36	877	84	275	28
8	-	-	<b>304</b>	<b>31</b>	699	70	344	35	<b>458</b>	<b>47</b>	<b>435</b>	<b>45</b>	943	90	388	40
9	-	-	-	-	<b>742</b>	<b>75</b>	489	50	-	-	-	-	<b>1013</b>	<b>97</b>	537	55
10	-	-	-	-	-	-	<b>624</b>	<b>64</b>	-	-	-	-	-	-	<b>675</b>	<b>69</b>

Образцы, обладающие меньшим уровнем водопоглощения, высокими показателями водонепроницаемости и морозостойкости подвергаются меньшему разрушению из-за меньшего капиллярного эффекта при взаимодействии вод с закрытыми порами бетонного камня.

Таблица 2.15. Параметры бетонов на вяжущем ЦЕМ142,5Н.

№	Наименование	Класс	Плотность	Прочн. сжатие	Прочн. растяж.	Водопоглощ.	Водонепрон.	Морозостойк.
		В, ед.	ρ ,кг/м³	σсж ,МПа	σраст , МПа	Wo,%	W, ед.	F, ед.
КИВ (карьерн.песок, известняк. 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, известняк. 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 2.16. Параметры бетонов на вяжущем ЦЕМ152,5Н.

№	Наименование	Класс	Плотность	Прочн. сжатие	Прочн. растяж.	Водопоглощ.	Водонепрониц	Морозостойк.
		В, ед.	ρ, кг/м <sup>3</sup>	σ <sub>сж</sub> , МПа	σ <sub>раст</sub> , МПа	W <sub>о</sub> , %	W, ед.	F, ед.
КИВ (карьерный песок, известняк. 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, известняк. 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

Ниже рассмотрены изменения конструктивных параметров модульных сооружений, которые вызываются переходом от принятого в строительстве специальных объектов бетона класса В30 на бетон класса В70, полученный путем

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.

При этом объем бетона, необходимого для возведения стен модульного сооружения может сократиться на 570 м<sup>3</sup>.

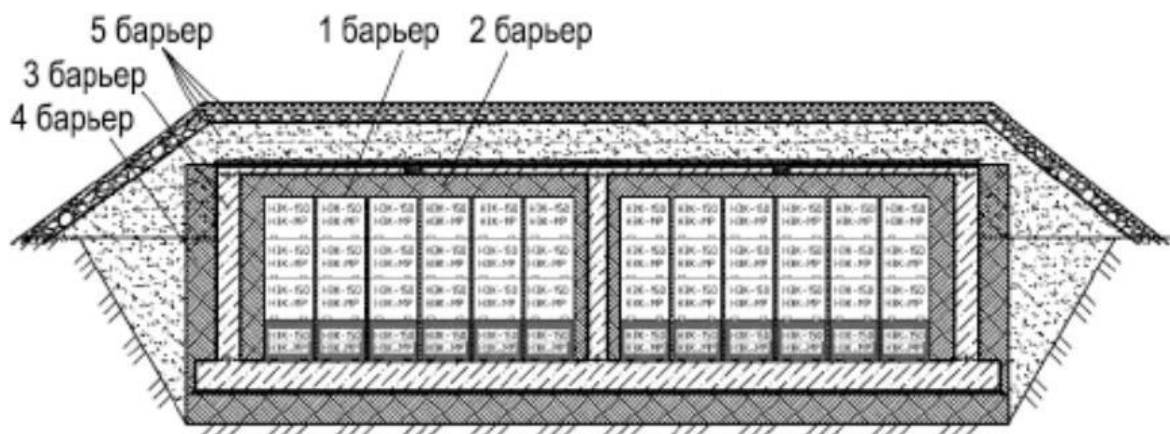


Рис.2.33. Параметры бетонных стен модульного сооружения ППЗРО при использовании бетона класса В30. 3 барьер (ИББ3): бетонные стены - 800 мм, основание - 1000 мм, верхнее перекрытие - 250 мм [54].

Толщина верхнего перекрытия, находящегося под нагрузкой – весом покрывающего многофункционального гидроизолирующего экрана, при использовании бетона класса В30 составляет 250 мм,  $\sigma_{изг} = 3,0$  МПа. При переходе на бетон класса В70,  $\sigma_{изг} = 7,5$  МПа толщина верхнего перекрытия может быть до 2,5 раз меньше.

Бетонное днище сооружается после укладки в траншею модульного сооружения глиняного подстилающего экрана (толщиной 1000 мм) по донной части модульного сооружения ППЗРО. Толщина бетонного днища модульного сооружения зависит от плотности и водонепроницаемости бетона. При использовании бетона класса В30 ( $\rho = 2,389$  т/м<sup>3</sup>,  $\sigma_{сж} = 43,4$  МПа, W6, F300), в проекте строительства ППЗРО толщина днища принята 1000 мм ([50], ГОСТ 27751-2014).

При переходе на бетон класса В70, ( $\rho = 2,485$  т/м<sup>3</sup>,  $\sigma_{сж} = 94,1$  МПа, W20, F600) толщина днища может быть уменьшена, обратно пропорционально увеличению плотности, до 960 мм. При этом объем используемого бетона может сократиться на 1786 м<sup>3</sup>. Водонепроницаемость днища возрастает с W6 до W20, т.е. в 3,3 раза. В сумме уменьшение объема бетона составит 2356 м<sup>3</sup>.

В таблице 2.17 приведены расчеты по изменению параметров модульных сооружений – несущих стен, верхнего перекрытия и основания модульного сооружения при переходе с бетона В7,5 на В70 и использовании добавок – нафталинсульфаната и поликарбоксилата в смеси портландцементов ЦЕМІ42,5Н и ЦЕМІ52,5Н, крупнозернистых и мелкозернистых наполнителей.

Модульные сооружения ППЗРО возводятся на срок эксплуатации, исчисляемый геологическими масштабами времени, сотни и тысячи лет. Первоочередной является задача обеспечения безопасности прилегающих территорий и населения от воздействия ионизирующего излучения РАО, находящихся в контейнерах, и несорбируемых радионуклидов, которые могут проникнуть в окружающее пространство вместе с грунтовыми водами. Использование высокопрочного бетона – это, в контексте решаемых задач,

продление срока безопасного состояния хранилищ ППЗРО - его модульных сооружений.

Таблица 2.17. Соотношения конструктивных параметров модульных сооружений – несущих стен, верхнего перекрытия и основания хранилища при переходе с на более прочные классы бетона и использовании добавок – нафталинсульфаната и поликарбоксилата.

	№№	Класс бетона	Плотность, кг/м³	Средняя прочность бетона, МПа	Толщина вертикальных конструкций: 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/м³ (класс В30 ρ=2389 кг/м³); 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/м³ (класс В30 σ=43,4 МПа); σп – плотность бетона рекомендуемого к применению.							
					Тд=0,25 м		Тд=0,8 м		Тд=1 м	ρд/ρп	σд/σп	
					Тп(ρ)	Тп(σ)	Тп(ρ)	Тп(σ)	Тп(ρ)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ЦЕМІ42,5Н+(КІВН)	1	7,5	2176	8	0,27	1,36	0,88	4,34	1,10	1,10	5,43	
	2	10	2196	11	0,27	0,99	0,87	3,16	1,09	1,09	3,95	
	3	12,5	2216	15,2	0,27	0,71	0,86	2,28	1,08	1,08	2,86	
	4	15	2236	18	0,27	0,60	0,85	1,93	1,07	1,07	2,41	
	5	20	2256	22,5	0,26	0,48	0,85	1,54	1,06	1,06	1,93	
	6	22,5	2276	27,6	0,26	0,39	0,84	1,26	1,05	1,05	1,57	
	7	25	2316	31,4	0,26	0,35	0,83	1,11	1,03	1,03	1,38	
	8	30	2376	37,6	0,25	0,29	0,80	0,92	1,01	1,01	1,15	
ЦЕМІ42,5Н+(РІВН)	1	7,5	2176	8,1	0,27	1,34	0,88	4,29	1,10	1,10	5,36	
	2	10	2196	10,8	0,27	1,00	0,87	3,21	1,09	1,09	4,02	
	3	12,5	2216	13,8	0,27	0,79	0,86	2,52	1,08	1,08	3,14	
	4	15	2236	17,7	0,27	0,61	0,85	1,96	1,07	1,07	2,45	
	5	20	2256	23	0,26	0,47	0,85	1,51	1,06	1,06	1,89	
	6	22,5	2277	25,3	0,26	0,43	0,84	1,37	1,05	1,05	1,72	
	7	25	2317	29,1	0,26	0,37	0,82	1,19	1,03	1,03	1,49	
	8	30	2377	36,9	0,25	0,29	0,80	0,94	1,00	1,00	1,18	



Продолжение таблицы 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЦЕМ42,5Н+(КГВН)	1	7,5	2176	9,4	0,27	1,15	0,88	3,69	1,10	1,10	4,62
	2	10	2196	12,9	0,27	0,84	0,87	2,69	1,09	1,09	3,36
	3	12,5	2220	15,2	0,27	0,71	0,86	2,28	1,08	1,08	2,86
	4	15	2231	19,6	0,27	0,55	0,86	1,77	1,07	1,07	2,21
	5	20	2256	24,8	0,26	0,44	0,85	1,40	1,06	1,06	1,75
	6	22,5	2276	28,2	0,26	0,38	0,84	1,23	1,05	1,05	1,54
	7	25	2311	30,4	0,26	0,36	0,83	1,14	1,03	1,03	1,43
	8	30	2391	38,4	0,25	0,28	0,80	0,90	1,00	1,00	1,13
	9	35	2426	43,5	0,25	0,25	0,79	0,80	0,98	0,98	1,00
	10	40	2456	52,7	0,24	0,21	0,78	0,66	0,97	0,97	0,82
ЦЕМ42,5Н+(РГВН)	1	7,5	2206	9	0,27	1,21	0,87	3,86	1,08	1,08	4,82
	2	10	2226	12,3	0,27	0,88	0,86	2,82	1,07	1,07	3,53
	3	12,5	2251	15,4	0,27	0,70	0,85	2,25	1,06	1,06	2,82
	4	15	2261	18,8	0,26	0,58	0,85	1,85	1,06	1,06	2,31
	5	20	2286	23,3	0,26	0,47	0,84	1,49	1,05	1,05	1,86
	6	22,5	2306	27,9	0,26	0,39	0,83	1,24	1,04	1,04	1,56
	7	25	2331	30,4	0,26	0,36	0,82	1,14	1,02	1,02	1,43
	8	30	2411	36,1	0,25	0,30	0,79	0,96	0,99	0,99	1,20
	9	35	2447	43,5	0,24	0,25	0,78	0,80	0,98	0,98	1,00
	10	40	2467	48,1	0,24	0,23	0,77	0,72	0,97	0,97	0,90
ЦЕМ52,5Н+(КВН)	1	7,5	2176	8,8	0,27	1,23	0,88	3,95	1,10	1,10	4,93
	2	10	2196	12,3	0,27	0,88	0,87	2,82	1,09	1,09	3,53
	3	12,5	2216	15	0,27	0,72	0,86	2,31	1,08	1,08	2,89
	4	15	2236	18,2	0,27	0,60	0,85	1,91	1,07	1,07	2,38
	5	20	2256	24,6	0,26	0,44	0,85	1,41	1,06	1,06	1,76
	6	22,5	2276	27,1	0,26	0,40	0,84	1,28	1,05	1,05	1,60
	7	25	2316	30,7	0,26	0,35	0,83	1,13	1,03	1,03	1,41
	8	30	2376	37,6	0,25	0,29	0,80	0,92	1,01	1,01	1,15
ЦЕМ52,5Н+(РВН)	1	7,5	2176	8,7	0,27	1,25	0,88	3,99	1,10	1,10	4,99
	2	10	2196	12,4	0,27	0,88	0,87	2,80	1,09	1,09	3,50
	3	12,5	2216	15,2	0,27	0,71	0,86	2,28	1,08	1,08	2,86
	4	15	2236	17,9	0,27	0,61	0,85	1,94	1,07	1,07	2,42
	5	20	2256	24,6	0,26	0,44	0,85	1,41	1,06	1,06	1,76
	6	22,5	2276	27,4	0,26	0,40	0,84	1,27	1,05	1,05	1,58
	7	25	2317	29,8	0,26	0,36	0,82	1,17	1,03	1,03	1,46
	8	30	2377	36,5	0,25	0,30	0,80	0,95	1,01	1,01	1,19
ЦЕМ52,5Н+(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	0,98	0,99

Продолжение таблицы 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	10	40	2456	53,8	0,24	0,20	0,78	0,65	0,97	0,97	0,81
ЦЕМІ52,5Н+(РГВН)	1	7,5	2206	9	0,27	1,21	0,87	3,86	1,08	1,08	4,82
	2	10	2226	12,5	0,27	0,87	0,86	2,78	1,07	1,07	3,47
	3	12,5	2251	15,8	0,27	0,69	0,85	2,20	1,06	1,06	2,75
	4	15	2261	18,4	0,26	0,59	0,85	1,89	1,06	1,06	2,36
	5	20	2286	24,8	0,26	0,44	0,84	1,40	1,05	1,05	1,75
	6	22,5	2306	27,6	0,26	0,39	0,83	1,26	1,04	1,04	1,57
	7	25	2331	30,4	0,26	0,36	0,82	1,14	1,02	1,02	1,43
	8	30	2411	37,2	0,25	0,29	0,79	0,93	0,99	0,99	1,17
	9	35	2446	44,4	0,24	0,24	0,78	0,78	0,98	0,98	0,98
	10	40	2467	50,7	0,24	0,21	0,77	0,68	0,97	0,97	0,86
ЦЕМІ42,5Н+(РІВП)	1	7,5	2139	8,9	0,28	1,22	0,89	3,90	1,12	1,12	4,88
	2	10	2159	11,4	0,28	0,95	0,89	3,05	1,11	1,11	3,81
	3	12,5	2178	14,6	0,27	0,74	0,88	2,38	1,10	1,10	2,97
	4	15	2198	17,3	0,27	0,63	0,87	2,01	1,09	1,09	2,51
	5	20	2218	22,3	0,27	0,49	0,86	1,56	1,08	1,08	1,95
	6	22,5	2237	25,3	0,27	0,43	0,85	1,37	1,07	1,07	1,72
	7	25	2276	27,8	0,26	0,39	0,84	1,25	1,05	1,05	1,56
	8	30	2335	32,3	0,26	0,34	0,82	1,07	1,02	1,02	1,34
	1	30	2389	42,2	0,25	0,26	0,80	0,82	1,00	1,00	1,03
	2	35	2395	47	0,25	0,23	0,80	0,74	1,00	1,00	1,08
ЦЕМІ42,5Н+(КТВП)	3	40	2445	55,3	0,24	0,20	0,78	0,63	0,98	1,02	1,27
	4	45	2455	62,8	0,24	0,17	0,78	0,55	0,97	1,03	1,45
	5	50	2465	64,6	0,24	0,17	0,78	0,54	0,97	1,03	1,49
	6	55	2465	71,8	0,24	0,15	0,78	0,48	0,97	1,03	1,65
	7	60	2470	79,9	0,24	0,14	0,77	0,43	0,97	1,03	1,84
	8	65	2480	84	0,24	0,13	0,77	0,41	0,96	1,04	1,94
	9	70	2486	91,4	0,24	0,12	0,77	0,38	0,96	1,04	2,11
	1	7,5	2169	9,1	0,28	1,19	0,88	3,82	1,10	1,10	4,77
	2	10	2188	11,9	0,27	0,91	0,87	2,92	1,09	1,09	3,65
ЦЕМІ42,5Н+(РГВП)	3	12,5	2212	14,7	0,27	0,74	0,86	2,36	1,08	1,08	2,95
	4	15	2222	18	0,27	0,60	0,86	1,93	1,08	1,08	2,41
	5	20	2247	23,3	0,27	0,47	0,85	1,49	1,06	1,06	1,86
	6	22,5	2266	25,9	0,26	0,42	0,84	1,34	1,05	1,05	1,68
	7	25	2296	30,7	0,26	0,35	0,83	1,13	1,04	1,04	1,41
	8	30	2374	35,7	0,25	0,30	0,81	0,97	1,01	1,01	1,22
	9	35	2403	42,6	0,25	0,25	0,80	0,82	0,99	0,99	1,02
	10	40	2423	48,1	0,25	0,23	0,79	0,72	0,99	0,99	0,90
	1	10	2139	12,3	0,28	0,88	0,89	2,82	1,12	1,12	3,53
	2	12,5	2159	15,7	0,28	0,69	0,89	2,21	1,11	1,11	2,76
ЦЕМІ52,5Н+(КІВП)	3	15	2178	18,8	0,27	0,58	0,88	1,85	1,10	1,10	2,31
	4	20	2198	24,6	0,27	0,44	0,87	1,41	1,09	1,09	1,76
	5	22,5	2217	27,9	0,27	0,39	0,86	1,24	1,08	1,08	1,56
	6	25	2237	30,4	0,27	0,36	0,85	1,14	1,07	1,07	1,43
	7	30	2276	36,9	0,26	0,29	0,84	0,94	1,05	1,05	1,18

Продолжение таблицы 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	8	35	2335	43,5	0,26	0,25	0,82	0,80	1,02	1,02	1,00
ЦЕМІ52,5Н+(РІВП)	1	10	2139	13,1	0,28	0,83	0,89	2,65	1,12	1,12	3,31
	2	12,5	2159	15,8	0,28	0,69	0,89	2,20	1,11	1,11	2,75
	3	15	2178	19,4	0,27	0,56	0,88	1,79	1,10	1,10	2,24
	4	20	2198	26,4	0,27	0,41	0,87	1,32	1,09	1,09	1,64
	5	22,5	2217	27,9	0,27	0,39	0,86	1,24	1,08	1,08	1,56
	6	25	2237	31,4	0,27	0,35	0,85	1,11	1,07	1,07	1,38
	7	30	2276	38,8	0,26	0,28	0,84	0,89	1,05	1,05	1,12
	8	35	2335	43,5	0,26	0,25	0,82	0,80	1,02	1,02	1,00
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
ЦЕМІ52,5Н+(РГВП)	1	7,5	2168	10,1	0,28	1,07	0,88	3,44	1,10	1,10	4,30
	2	10	2188	13,8	0,27	0,79	0,87	2,52	1,09	1,09	3,14
	3	12,5	2212	16,6	0,27	0,65	0,86	2,09	1,08	1,08	2,61
	4	15	2222	20,4	0,27	0,53	0,86	1,70	1,08	1,08	2,13
	5	20	2247	26,9	0,27	0,40	0,85	1,29	1,06	1,06	1,61
	6	22,5	2266	29,1	0,26	0,37	0,84	1,19	1,05	1,05	1,49
	7	25	2295	33	0,26	0,33	0,83	1,05	1,04	1,04	1,32
	8	30	2373	39,2	0,25	0,28	0,81	0,89	1,01	1,01	1,11
	9	35	2403	46,1	0,25	0,24	0,80	0,75	0,99	0,99	0,94
	10	40	2422	51,7	0,25	0,21	0,79	0,67	0,99	0,99	0,84

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В главе рассмотрены отечественные виды вяжущих, применяемые при производстве геотехнологических полимеров (бетонов), приведена систематизация геотехнологических полимеров по классам применения. Применение высокопрочных долгоживущих бетонов предусмотрено при возведении бетонных оснований модульных сооружений ППЗРО, стен и верхних покрытий.

1. Рассмотрены современные конструкционные материалы, проведён анализ имеющихся железобетонных и металлических контейнеров для хранения радиоактивных отходов в ППЗРО. На основании НП-093-14 [53] выявлены

требования к геотехнологическим полимерным материалам (на цементном вяжущем), применяемым при изготовлении контейнеров РАО.

2. Установлена технологическая возможность регулирования физико-механических характеристик (прочность, водопоглощение, морозостойкость, водонепроницаемость) геотехнологического полимера (бетона) путем применения нафталинсульфанатной и поликарбоксилатной добавок и управления показателями плотности получаемого полимера.

3. Применение мелко - и крупнозернистых материалов - наполнителей различной природы позволяет получить бетоны в широком диапазоне классов, от В7,5 до В70, при схожих объёмах компонентов в 1 м<sup>3</sup>. Введение пластифицирующих добавок в бетон позволяет уменьшить водоцементное соотношение и увеличить прочностные характеристики образцов бетона до 50%, повысить физические характеристики (плотность, водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость), а также стойкость к воздействию сульфатов, входящих в химический состав грунтовых вод.

4. Установлено влияние исходных сырьевых материалов и пластифицирующих добавок на физико-механические характеристики бетонов; в динамике изменения показателей имеются схожие зависимости на разных марках бетона. В рамках исследований разработано 16 составов бетонной смеси, состоящих из 4 комбинаций компонентов (крупно - и мелкозернистых наполнителей, воды, портландцемента двух классов (ЦЕМ 142,5Н, ЦЕМ 1 52,5Н), суперпластифицирующих добавок - нафталинсульфанатов, поликарбоксилатов).

5. Применение поликарбоксилатных добавок в сравнении с нафталинсульфанатными позволяет получить бетоны более высоких марок по классу прочности: применение добавок на основе нафталинсульфанатов обеспечивает получение бетонов классов В7,5-В40, применение добавок на основе поликарбоксилатов — получение бетонов классов В30-В70. Образцы, изготовленные на вяжущем ЦЕМ I 52,5Н, обладают в 1,6 раза более высокими физико-механическими характеристиками по сравнению с ЦЕМ I 42,5Н, динамика

изменения физико-механических характеристик указывает на стабильную зависимость от крупно - и мелкозернистых наполнителей в составе образцов.

6. Образцы, обладающие меньшим уровнем водопоглощения, высокими показателями водонепроницаемости и морозостойкости имеют меньшую степень разрушения благодаря меньшему капиллярному эффекту при взаимодействии водных сульфатов с закрытыми пораами бетонного камня. Динамика изменения стойкости образцов бетонов к сульфатным средам (раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с концентрацией ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , 500мг/л) характеризует замедление процессов коррозии бетона симбатно с увеличением плотности, водонепроницаемости и морозостойкости.

7. Применение составов (ЦЕМІ52,5Н+(КГВН)) с добавкой 1 обеспечит срок эксплуатации бетонных конструкций 628 лет. Применение составов (ЦЕМІ52,5Р+(КГВП)) с добавкой 2 обеспечит срок эксплуатации бетонных конструкций 1013 лет в геологических условиях региона размещения ППЗРО.

8. Установлены различия в сроках службы бетона при воздействии растворов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с различными концентрациями ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  - 500 и 5000 мг/л. При этом видна значительная разница в сроках службы бетона в зависимости от концентрации ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . Для бетона с цементом 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 цементом ЦЕМІ52,5Н, составом КГВН, добавкой 1 разница в сроках службы составит 564 года, для состава КГВП разница в сроках службы составит 1735 лет. Концентрация сульфатов имеет важное значение для обеспечения долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности, это следует иметь в виду при выборе площадок, учитывать их обводненность при проектировании и строительстве ППЗРО.

9. Переход от принятого в строительстве специальных объектов бетона класса В30 на бетон класса В70 с использованием добавки поликарбоксилата, открывает возможность конструктивных изменений модульных сооружений. В проектировании и строительстве (ГОСТ 27751-2014), при возведении бетонных стен используется бетон класса В30 ( $\rho=2,389 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{\text{сж}}=43,4 \text{ МПа}$ , W6, F300).

Переход на бетоны класса В70 ( $\rho=2,485 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{сж}=94,1 \text{ МПа}$ , W20, F600) позволит уменьшить толщину несущих стен модульных сооружений, обратно пропорционально прочности используемого бетона на сжатие, т.е. в 2,17 раза (с учетом запаса прочности), при прочих равных условиях. При исходной толщине стены 800 мм, с переходом на бетон В70 толщина стены равна 369 мм.

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

Параметры бетонного днища модульного сооружения зависят от плотности и водонепроницаемости бетона; при использовании бетона класса В30 толщина днища принята 1000 мм. При переходе на использование бетона класса В70 толщина днища может быть уменьшена до 960 мм.

10. На основе выполненных исследований, в составе авторского коллектива, выпущена техническая документация (см. Приложение Г):

- технологический процесс производства суперпластификатора на основе нафталинсульфанатов «ReoPlast 20S» (ТУ 20.59.59-002-03461300-2022);

- технологический процесс производства высокоэффективного суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов «ReoPlast L8500» (ТУ 20.59.59-004-03461300-2022);

- технологический регламент «Производство бетонных смесей классов В7,5-В25» с применением суперпластификатора на основе нафталинсульфанатов «ReoPlast 20S»;

- технологический регламент «Производство бетонных смесей классов В30-В70» с применением высокоэффективного суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов «ReoPlast L8500».

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРОВ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

#### 3.1. Разработка методических положений проектирования вертикального барьера долговременной безопасности на основе композиционного трубчатого шпунта с обоснованием проектных конструктивных параметров

Современные неметаллические материалы нашли применение в различных отраслях промышленности, в том числе и строительстве объектов долговременной изоляции опасных отходов. Применение полимерных и композиционных материалов в изделиях: шпунты, сваи, позволило заменить классические металлические шпунты и сваи при возведении сложных гидротехнических сооружений, объектов специального назначения, а также в промышленном и гражданском строительстве. Шпунтовое ограждение предусматривается по контурам модульных сооружений и всего ППЗРО. План модульных сооружений и площадки ППЗРО представлен на рисунке 3.1.

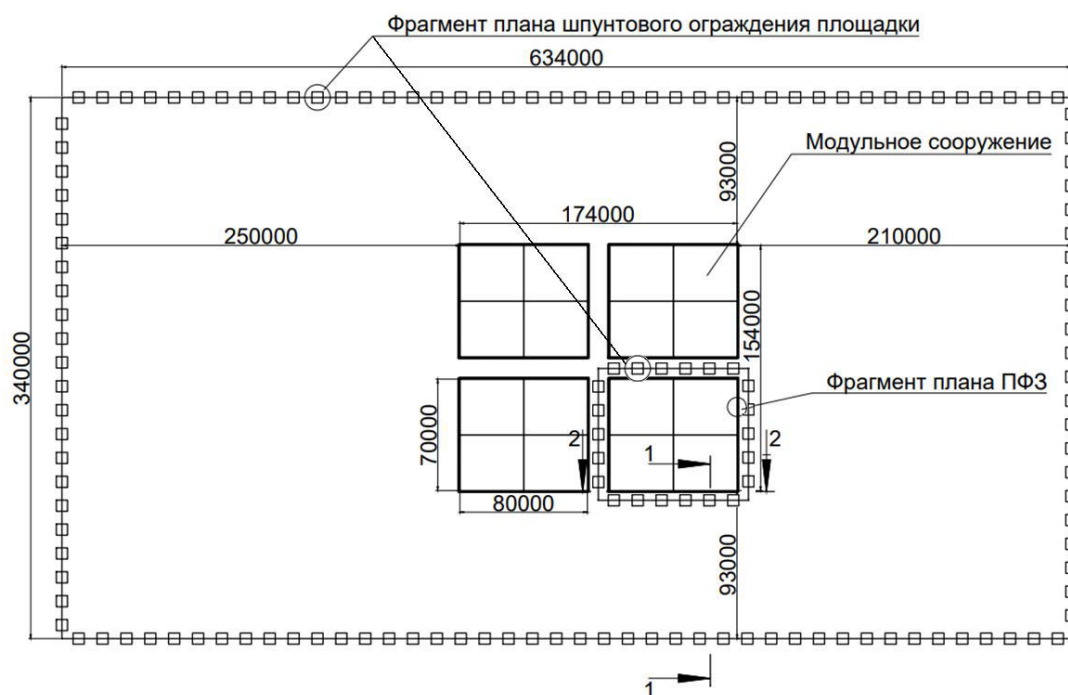


Рис.3.1. Возведение трубошпунтовой завесы вокруг модульных сооружений и площадки ППЗРО.

Сооружения, на которых применяются шпунты и сваи (шпунтовые) можно разделить на два типа:

1) ограждения постоянного типа (стенки берегоукрепления гидротехнических сооружений (водохранилищ, бо́льверк портов речных и морских, антропогенных островов), устройства подпорных стен (часть элементов в комплексе укрепления оползневых склонов), выправительные сооружения (укрепление участков, подверженных паводкам и наводнениям), береговые опорные сооружения мостов (шпунтовые сваи-опоры). Неметаллические сваи (шпунтовые) нашли применение, как ограждения постоянного типа в несущих опорных конструкциях мостов;

2) ограждения временного типа (ограждающие конструкции котлованов зданий, сооружений, тоннелей и иных строительных объектов, производимых открытым способом, опорные сооружения мостов и гидротехнических сооружений). Неметаллические шпунты нашли применение как ограждения временного типа, укрепления грунтов позволяющие многократно монтировать и демонтировать их на объекте строительства).

Конструкции из шпунтов на основе полимерных композиционных материалов разрабатывались с учётом применения в различных климатических условиях (умеренный и полярный), сейсмически активных условиях (до 9 баллов) и агрессивных средах, в соответствии с классификацией. Срок эксплуатации шпунтов и свай (шпунтовые) на основе полимерных композиционных материалов определяется заводом - изготовителем исходя из условий эксплуатации и указывается в сертификате на выпускаемую продукцию.

Выбор вертикальной противofильтрационной завесы. Для эффективного функционирования вертикальной противofильтрационной завесы (ПФЗ) необходимо произвести анализ технологий, нашедших применение в практике. Анализ проведен по 5 вариантам:

1. Стальной шпунт (шпунт Ларсена) и закрепление грунта между рядами шпунтов по технологии высоконапорной струйной цементации Jet-3.



2. Полимерный шпунт (шпунт Монблан из поливинилхлорида) с закреплением грунта.
3. Композитный шпунт (из полимерных композиционных материалов, произведённый технологией пултрузии) в 2 ряда с укреплением грунта.
4. Сплошная противофильтрационная завеса из грунтоцемента, выполненная по технологии струйной цементации Jet-1 диаметром 800 мм в 3 ряда шириной 2 метра.
5. Стена в грунте траншейного типа (из бетона В25, W12, F150) шириной 600 мм.

Сравнительный анализ затрат различных технологий на 1 км периметра противофильтрационной завесы (ПФЗ) приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Анализ затрат на 1 км ПФЗ с применением различных технологий.

№	Материал ПФЗ	Ед. изм	Площадь или объем 1 км периметра ПФЗ 12 м глубиной	Цена материала	Стоимость работы за м <sup>2</sup>	Стоимость с НДС, Р
1	Стальной шпунт Ларсен 5 – УМ 2 ряда	м <sup>2</sup>	24000	16000	8000	576 000 000
2	Шпунт ПВХ типа Монблан в 2 ряда	м <sup>2</sup>	24000	3720	7440	267 840 000
3	Трубошпунт композиционны й в 2 ряда	м <sup>2</sup>	24000	11000	9000	480 000 000
4	Закрепление в 3 ряда jet-1 шириной 2 м	м <sup>2</sup>	24000	3000	15000	432 000 000
5	Стена в грунте из бетона В25 W12 F150	м <sup>2</sup>	7200	7000	28000	252 000 000

Стальной шпунт (шпунт Ларсена). Технология установки шпунта представляет собой погружение шпунта в грунт (длина шпунта до 24 м). В верхней части шпунта устанавливается железобетонный пояс (высота пояса 400 мм).

Шпунтовые ряды погружаются забивкой, вибропогружателем или задавливанием с заглублением в водоупор на глубину не менее 2 м (рисунок 3.2).

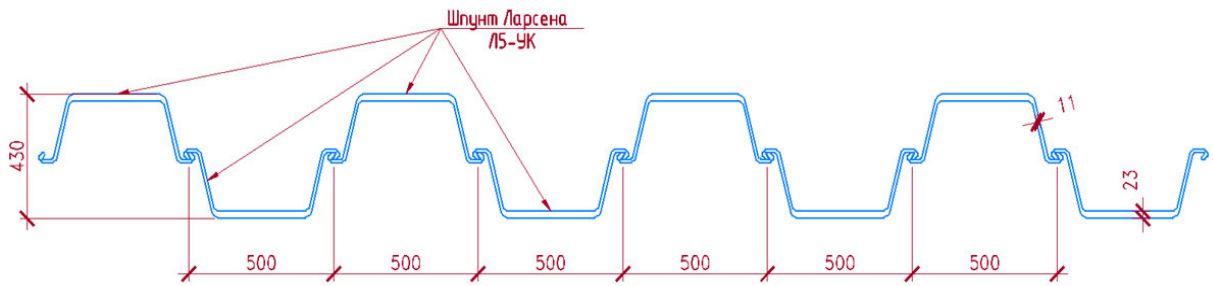


Рисунок 3.2 - Пример стального шпунтового ограждения [120].

Согласно нормам [121], ниже рассматривается оценка количества жидкости, просачивающейся через стальную шпунтовую стенку (шпунт Ларсена). Шпунтовая стенка заглублена в водонепроницаемый слой грунта. Приток вод с уровней ниже подошвы шпунтовой стенки не рассматривается. Наибольший перепад давления возникает в нижней части строительного котлована и впоследствии остается постоянным [121].

Максимальный перепад определяется по формуле [97]:

$$\Delta p_{\max} = \gamma_w H \quad (3.1)$$

Общее количество протекающей через замок шпунта жидкости составляет [121]:

$$Q_1 = \int_0^{h+H} q_z (dz) = \left(\frac{\rho}{\gamma_w}\right) \int_0^{h+H} \Delta q_z dz \quad (3.2)$$

с падением давления:

$$\Delta p = \gamma_w z, \text{ если } z < H;$$

$$\Delta p = \gamma_w H, \text{ если } H < z < H+h;$$

Интеграл в итоге дает площадь под диаграммой давления, и уравнение выглядит следующим образом:

$$Q_1 = \rho H (0,5H + h) \quad (3.3)$$

Число замков шпунтовой стенки в строительном котловане составляет  $n = L/b$ , где  $L$  - длина периметра строительного котлована, м;  $b$  - ширина системы шпунтовых свай, м.

Общее количество протекающей жидкости составит:

$$Q = nQ_I \quad (3.4)$$

Показатель  $Q$  является консервативной оценкой, относимой к запасу надежности, величине притока грунтовых вод, поскольку некоторые аспекты, например влияние характера течения на уровни грунтовых вод вблизи шпунтовой стенки, были опущены. Для ПФЗ периметром 1948 м (внешний контур ППЗРО), и 300 м (вокруг модульного сооружения, в соответствии с планом сооружения ППЗРО, Приложение В), длина завес 1948 м и 300 м, шпунтовыми сваями шириной  $b = 500$  мм.

Максимальный перепад уровня грунтовых вод слева и справа от ПФЗ глубиной  $H=5,2$  м, расстояние до водоупорного слоя грунта  $h=2$  м. Герметизированный замок шпунта описывается величиной, обратной значению сопротивления просачиванию, [121]:

$$\rho = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м/с.}$$

Число замков составляет  $n = 1948/0,5 = 3896$  штук по периметру ППЗРО, число замков по периметру модульного сооружения (МС)  $n = 300/0,5 = 600$ .

Количество протекающей жидкости на каждый замок,  $\text{м}^3/\text{с}$ , рассчитывают по формуле [121]:

$$Q_1 = \int_0^{h+H} q_z (dz) = \left(\frac{\rho}{\gamma_w}\right) \int_0^{h+H} \Delta q_z dz, \quad (3.5)$$

$$Q_I = \rho H(0,5H+h), \quad (3.6)$$

$$Q_I = 5 \cdot 10^{-10} \cdot 5 (0,5 \cdot 5 + 2) = 1,125 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Возможное поступление воды за пределы ПФЗ (шпунт Ларсена) составит:

- для ППЗРО:  $Q = 3896 \cdot 1,125 \cdot 10^{-8} = 4,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  или  $1381 \text{ м}^3$  в год;

- для МС:  $Q = 600 \cdot 1,125 \cdot 10^{-8} = 0,675 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  или  $212 \text{ м}^3$  в год.

Таким образом, в соответствии с нормами [121], для исключения проникновения опасных отходов одного ряда шпунтов Ларсена недостаточно.

Долговечность противофильтрационной завесы из стального шпунта обуславливается коррозионной стойкостью стали. По данным [122] устойчивость стали к грунтовым водам низкая (мокрая коррозия). В нормативной литературе не регламентируется скорость коррозии стальных незащищенных конструкций в

различных средах, однако максимальная скорость коррозии поверхностной площадки в агрессивных средах определяется величиной менее 1 мм/год [122].

Самая тонкая часть шпунта Ларсен Л5-УМ (стенка) имеет толщину 11,4 мм. Таким образом, время, необходимое для полного разрушения шпунтовой стенки при максимально возможной коррозии составит:  $T=11,4/1=11$  лет, что явно не удовлетворяет требованиям эксплуатации объектов ППЗРО.

Полимерный трубчатый шпунт. Для защиты ППЗРО от грунтовых вод по периметру изоляции полигонов опасных отходов устраивается противοfiltrационная завеса (ПФЗ, вертикальный барьер) в виде стены в грунте из трубошпунта, выполненного из стеклопластика или углепластика. Замки шпунтового ограждения, стыки между элементами закрепления фильтруют грунтовую воду, что может привести к сульфатной коррозии железобетонных конструкций ППЗРО. Разработки новых технологий и материалов для противοfiltrационных завес находятся в стадии исследований. Положительные результаты достигнуты при использовании технологий струйной цементации и стального шпунта [123].

Уровни подземных вод в модульных сооружениях рассматриваемого ППЗРО.

Данные по глубинам залегания подземных вод для рассматриваемых модульных сооружений ППЗРО приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Уровень подземных вод на период наиболее высокого его положения (на 05.2017г.)

Обозначение модульных сооружений, №	Глубина от поверхности до уровня подземных вод, м	Заглубление (низ плиты основания фундамента), м	Глубина от нижней точки подвала до уровня подз.вод, м
2/5	8,80	3,85	4,95
2/6	10,03	5,2	4,83
2/8	9,40	3,5	5,9
2/9	10,02	3,95	6,07

Из таблицы 3.2 следует, что в обычных условиях эксплуатации модульных сооружений затопление им не угрожает. Трубошпунтовая завеса создается для

экстренной ситуации, когда уровень грунтовых вод будет выше уровня нижней точки подвала.

По внешнему периметру ППЗРО и контурам модульного сооружения предусматривается установка противофильтрационной завесы, которая выполняется из полимерного композитного материала (ПКМ), трубного шпунта. Испытания шпунта приведены на Рис. 3.3.

Для противофильтрационной завесы периметром 1948 м (в соответствии с планом сооружения ППЗРО, Приложение В, завеса представляется длиной  $(634+340)*2 = 1948$  м), шпунтовыми сваями шириной  $b = 500$  мм. Максимальный перепад уровня грунтовых вод слева и справа от противофильтрационной завесы для сооружений принимается равным глубине заложения фундаментной плиты наиболее заглубленного сооружения 2/8,  $H=5,2$  м, расстояние до водоупорного слоя грунта - глина элювиальная ИГЭ 3.2,  $h=2$  м.



Рисунок 3.3 - Трубошпунт производства АО «НИИГрафит» на испытательном стенде предела прочности при изгибе [124].

В соответствии с [121] герметизированный замок шпунта описывается величиной, обратной значению сопротивления просачиванию:  $\rho = 5 \cdot 10^{-10}$  м/с. Число замков составляет  $n = 1948/0,5 = 3896$  (периметр ППЗРО),  $n = 300/0,5 = 600$  (МС). Возможное общее поступление воды за пределы противофильтрационной завесы составляет:

- для ППЗРО  $Q = 3896 \cdot 1,125 \cdot 10^{-8} = 4,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  или  $1381 \text{ м}^3$ ;
- для МС  $Q = 600 \cdot 1,125 \cdot 10^{-8} = 0,675 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  или  $212 \text{ м}^3$  за каждый год эксплуатации.

Таким образом, в соответствии с нормами [121] для исключения проникновения радиоактивных отходов в грунтовые воды только шпунта ПКМ недостаточно. Поэтому предлагается вокруг каждого модульного сооружения ППЗРО выполнить противofильтрационную завесу, состоящую из комбинации трубошпунтов и струйной технологии, и прикрепить трубошпунтовую конструкцию анкерами к боковым породам. При струйной цементации в грунте образуются вертикальные грунтоцементные колонны из смеси цемента, комплексной добавки струйной цементации (КДСЦ), грунта и воды [123].

Решение задачи ликвидации протечек завесы из полимерных трубчатых шпунтов предлагается осуществить путем выполнения замков в виде пересекающихся, взаимно проникающих колонн грунтоцементного раствора струйной цементации (Рис.3.5) [123]. Технология струйной цементации подробно приведена ниже.

Применение добавок 1 (нафталинсульфанатной) и 2 (поликарбоксилатной), рассмотренных в главе 2, для струйной цементации невозможно, т.к. они используются для стабилизации коллоидной системы высокопрочных бетонов для возведения стен, оснований и покрытий модульных сооружений, эффективно взаимодействуют в узком диапазоне величин с компонентами бетона, но не с раствором грунта.

Последовательность работ по установке трубошпунтовой противofильтрационной завесы (ПФЗ): вначале создается грунтоцементная колонна диаметром до 1м - производится размыв грунта по струйной технологии на всю глубину шпунта. Далее, благодаря круглой форме, трубошпунт, без большого сопротивления погружается в колонну, состоящую из размывого грунта с цементом и добавкой КДСЦ (Рис.3.5.). После отверждения грунтоцементных колонн с трубошпунтом повышается изгибная жесткость ПФЗ, контролируется наличие протечек между трубами [124].

Основные достоинства полимерных трубошпунтов: малый вес; простота изготовления, малые эксплуатационные затраты; высокая степень изоляции объекта, стойкость к агрессивным средам; эстетические показатели – внешний вид лучше, чем у стального шпунта и ж/б стены в грунте. На рисунке 3.4 представлена модель трубошпунтовой завесы.

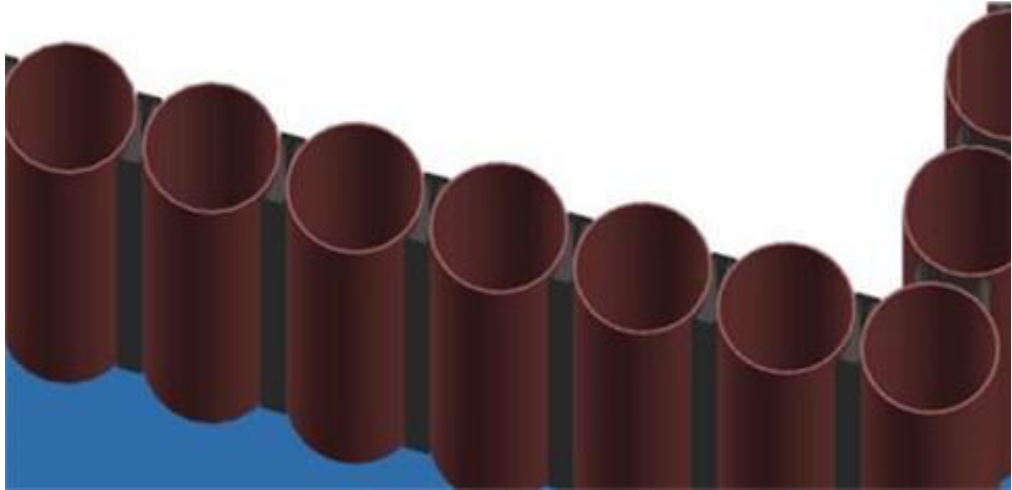


Рисунок 3.4 - Противофильтрационная завеса из трубных шпунтовых профилей [125].

Схема трубошпунтовой завесы представлена на рисунке 3.4.

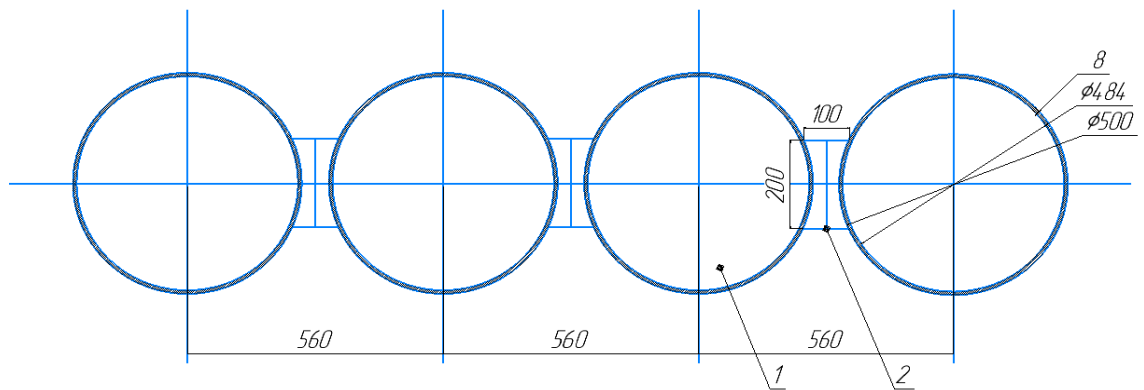


Рисунок 3.5 – Трубошпунтовая завеса из стеклопластиковых труб [126]; 1 – шпунт круглого сечения; 2 – двутавр из полимерного конструкционного материала (ПКМ), выполняет роль заборки/ замкового соединения.

Процесс погружения трубошпунта приведен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 - Погружение трубошпунта в колонну струйной цементации [124].

Материал трубошпунта должен отвечать следующим требованиям:

- предел прочности (текучести) на растяжение  $R_{t0,95}$  не менее 166 МПа,
- предел прочности (текучести) на изгиб  $R_{t0,95}$  не менее 200 МПа,
- модуль упругости  $E$  не менее 25 ГПа.

Изолирующие свойства грунтоцементной завесы приведены в главе 4.

### **3.2. Блок-схема алгоритма расчета технологических параметров вертикальной противοfiltrационной завесы с анкерным креплением**

Главными параметрами при устройстве вертикальных барьеров (противοfiltrационных завес), определяющими эффективность изоляции стены в грунте из трубного шпунта являются деформативность и изгибающий момент шпунта. На данные показатели влияют комплекс геометрических и прочностных параметров: расчетных схем работы, глубины котлована, грунтовых условий и дополнительных технических решений, повышающих устойчивость стены к боковому давлению.

На рисунке 3.7 представлено дерево решений (блок-схема алгоритма) по расчёту технологических параметров трубошпунта с анкерным креплением.



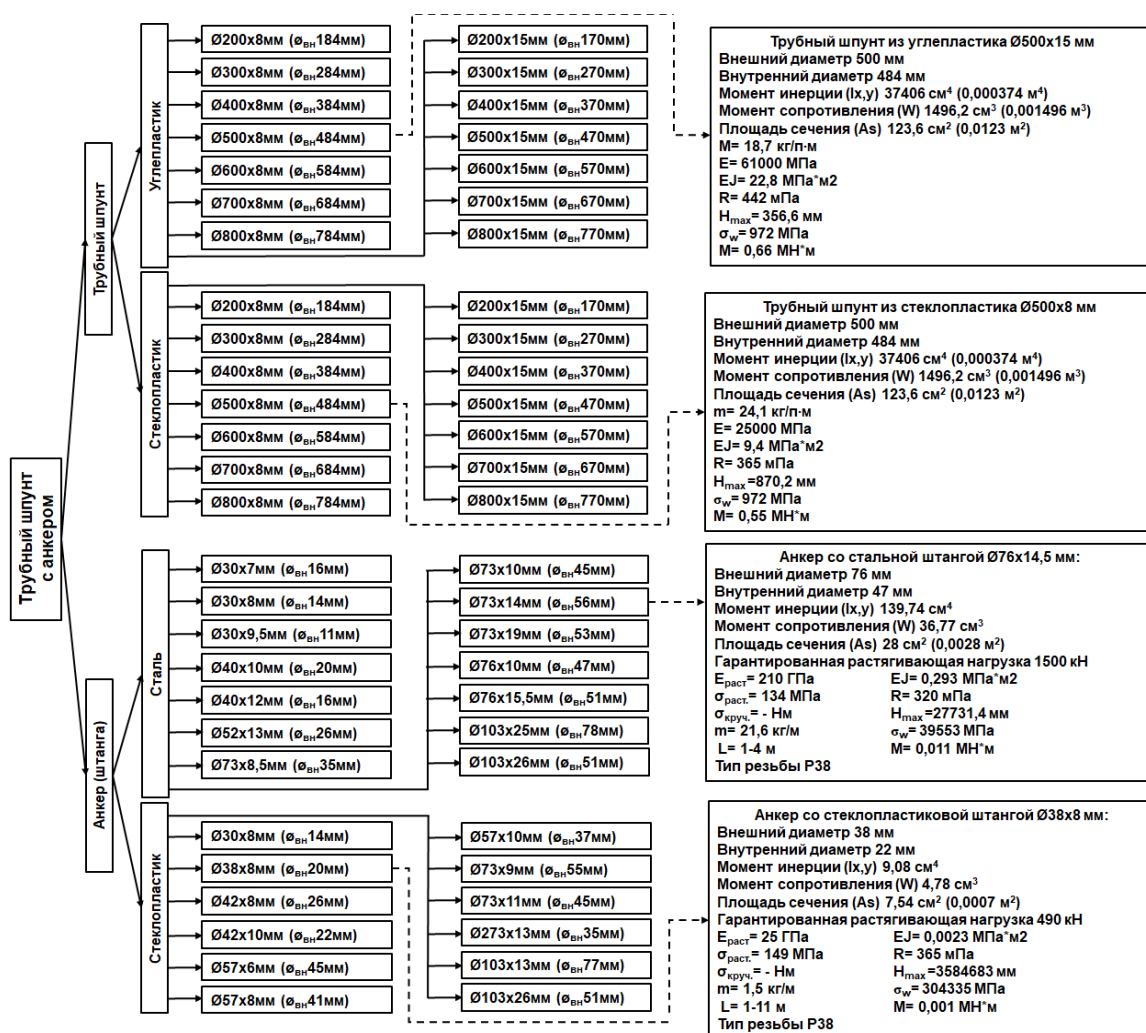


Рисунок 3.7 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по подбору параметров углепластикового, стеклопластикового трубного шпунта и полимерного композиционного анкера.

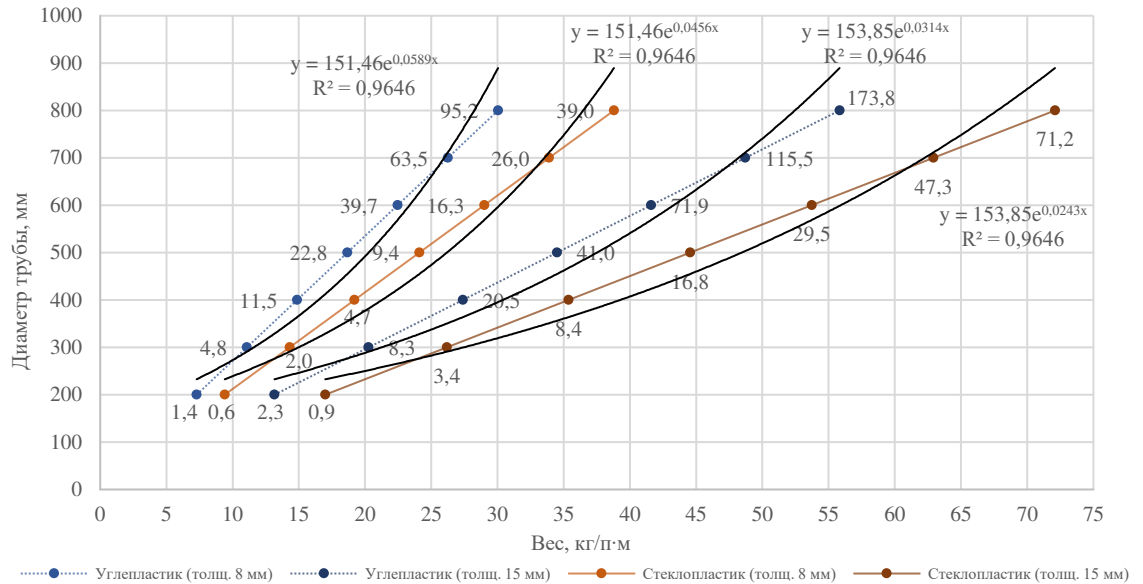
В Приложении В, таблицах 1, 2 приведены результаты расчётов нагрузки на элемент трубошпунта из углепластика, стеклопластика. В таблице 2 Приложения В приведены результаты расчёта нагрузки на анкерное крепление.

Для определения оптимальных технологических параметров сооружения вертикального гидроизолирующего барьера из трубошпунта произведен анализ параметров, влияющих на эффективность барьера.

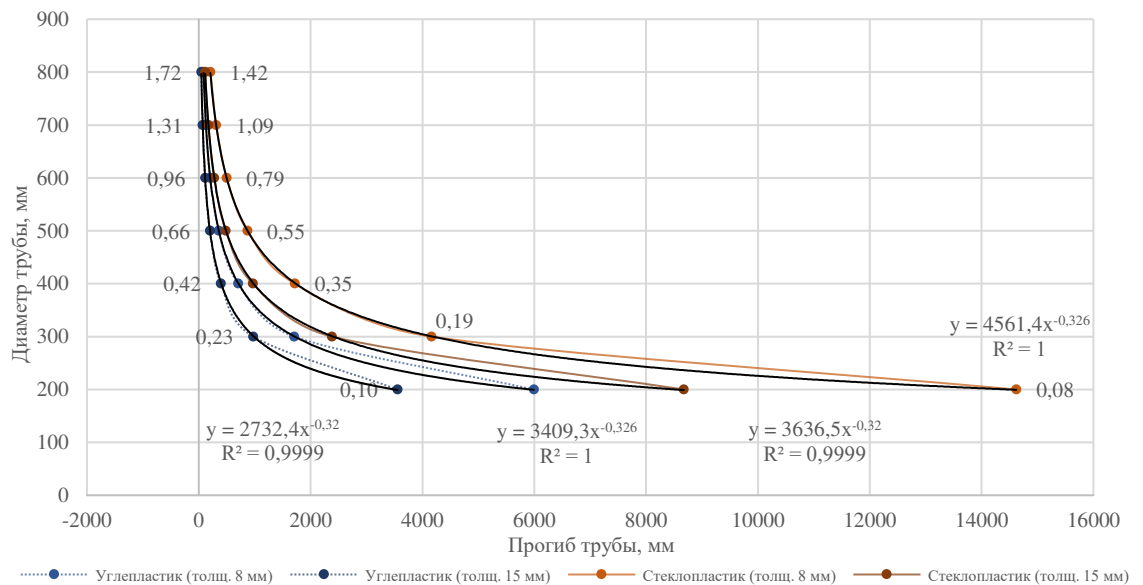
Расчёты произведены для изготовления труб из углепластика и стеклопластика, рассмотрены разные диаметры труб шпунта (от 200 мм до 800 мм), толщины стенки (8 мм, 15 мм), а также штанги анкера с учётом разных диаметров (от 30 мм до 103 мм), толщины стенки (от 6 мм до 26 мм).

В таблице 1 приложения В и на рисунках 3.8, а), б) приведены взаимозависимости показателей элемента трубчатого шпунта, а именно жесткости стенки, прогиба, изгибающего момента трубы и диаметра трубы.

Динамика изменения параметров выявляет идентичный механизм у трубы из углепластика и из стеклопластика, вне зависимости от диаметра.



а)



б)

Рисунок 3.8 - Взаимосвязи диаметра трубы с: а) весом трубы и жесткостью её стенки, б) прогибом трубы и изгибающим моментом в момент сопротивления.

При изготовлении трубошпунта толщина стенок определяется количеством намоток пластиковой нити определенной толщины плотными витками на круглую заготовку нужной длины. Далее витки намотки пропитываются эпоксидной либо другой полимерной смолой с высокой собственной прочностью при отверждении, в результате получается прочная труба заданного диаметра и длины.

Параметры труб при изготовлении. Увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм из углепластика приводит к увеличению веса при толщине намотки стенки нитью толщиной 8 мм:

- у трубы  $\varnothing 200-500$  мм (от 52% до 26% за каждый шаг), возрастанию веса с 8,7 до 22,2 кг/п·м и росту показателя жёсткости EJ с 1,4 до 22,8 МПа·м<sup>2</sup>;
- у трубы  $\varnothing 600-800$  мм (от 20% до 14% за каждый шаг) возрастанию веса с 15,8 до 35,8 кг/п·м и росту показателя жёсткости EJ с ~40 до 95 МПа·м<sup>2</sup>.

При намотке трубы нитью толщиной 15 мм:

- у трубы с  $\varnothing 200-500$  мм (от 54% до 26%), возрастание веса с 24,2 до 41,1 кг/п·м и EJ с 2,3 до 41 МПа·м<sup>2</sup>;
- у трубы с  $\varnothing 600-800$  мм (от 21% до 15%), возрастание веса с 49,6 до 66,6 кг/п·м и EJ с ~72 до 174 МПа·м<sup>2</sup>.

Увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм из стеклопластика приводит к увеличению веса при толщине намотки стенки 8 мм:

- у трубы  $\varnothing 200-500$  мм (от 52% до 26%) с 9,4 до 24,1 кг/п·м и EJ с ~0,6 до ~9,5 МПа·м<sup>2</sup>;
- у трубы  $\varnothing 600-800$  мм (от 20% до 14%) с 29 до 38,8 кг/п·м и EJ с ~16 до 39 МПа·м<sup>2</sup>.

При толщине намотки стенки 15 мм:

- у трубы  $\varnothing 200-500$  мм (от 54% до 26%) с 17 до 44,5 кг/п·м и EJ с ~1 до 17 МПа·м<sup>2</sup>;
- у трубы  $\varnothing 600-800$  мм (от 21% до 15%) с 53,7 до 72,1 кг/п·м и EJ с 29,5 до 71 МПа·м<sup>2</sup>.

Так же с увеличением диаметра и жесткости трубы происходит снижение прогиба и рост изгибающего момента с увеличением момента сопротивления трубы.

У углепластиковой трубы при толщине намотки 8 мм с  $\varnothing 200-500$  мм происходит снижение прогиба в ~18 раз с ~6 м до 0,35 м и увеличение изгибающего

момента (от 60% до 135%) с 0,1 до 0,66 МН·м. У трубы  $\varnothing 600-800$  мм динамика изменения показателя прогиба демонстрирует 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.

Увеличение толщины намотки стенки до 15 мм приводит к снижению показателя прогиба у трубы  $\varnothing 200$  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 (от 60% до 143%) с 0,17 до 1,19 МН·м. У труб диаметром  $\varnothing 600-800$  мм показатели также, как и у труб с толщиной стенки 8 мм, что указывает на умеренное снижение прогиба от 113 мм до 46 мм (изменение составляет от 32% до 46%), изгибающий момент 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 [127]) в 2,4 раза меньше, чем у углепластика (61000 МПа [127]), показатели прогиба трубы из-за этого выше практически в три раза, показатель изгибающего момента меньше в среднем на 25%.

При толщине намотки 8 мм и диаметре от 200 мм до 500 мм показатель прогиба трубы 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. При диаметре 600-800 мм показатель прогиба трубы снижается более чем в 2 раза, с 0,5 м до 0,2 м, изгибающий момент симбатно увеличивается в  $\sim 2$  раза с 0,79 до 1,42 МН·м.

Увеличение толщины намотки до 15 мм позволяет снизить показатель прогиба у трубы  $\varnothing 200$  чуть больше чем в 1,5 раза по сравнению с трубой  $\varnothing 200$  со стенкой 8 мм и прогибом 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 труб диаметром 600-800 мм показатели имеют сдержанное изменение прогиба от 276 мм до 114 мм, изгибающий момент - с 1,44 до 2,60 МН·м.

Трубошпунтовая завеса прикрепляется по боковой стенке к породному массиву с помощью самозабуривающейся анкерной крепи (Рис.3.9). Штанга

анкерной крепи испытывает при этом сложную нагрузку. В соответствии с выполненными расчетами, в таблице 3.3 и на рисунке 3.10 а) приведены зависимости влияния нагрузки на пределе текучести и пределе прочности на площадь сечения стеклопластиковой штанги анкера, в сравнении с параметрами стальной штанги.

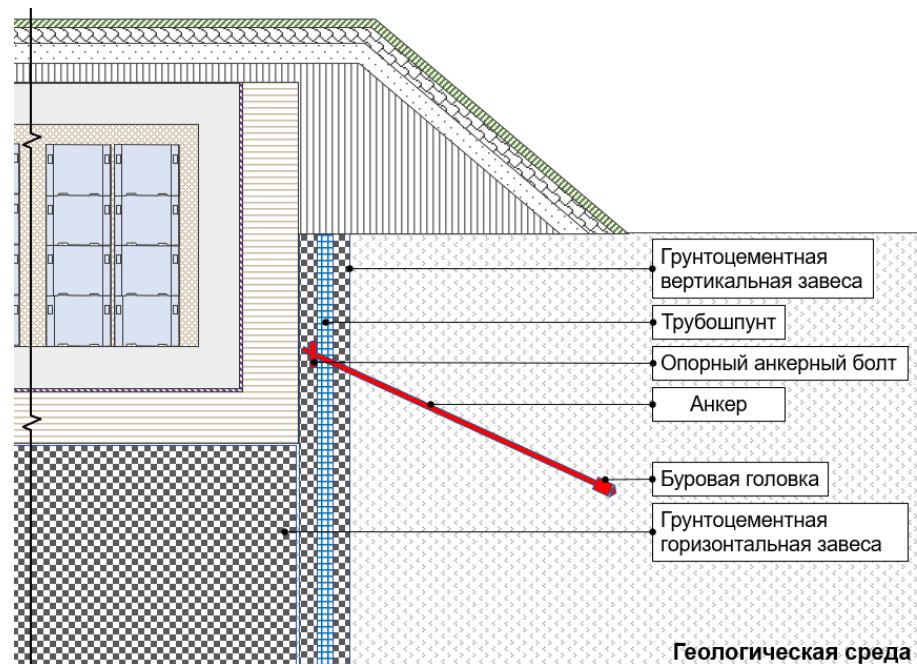
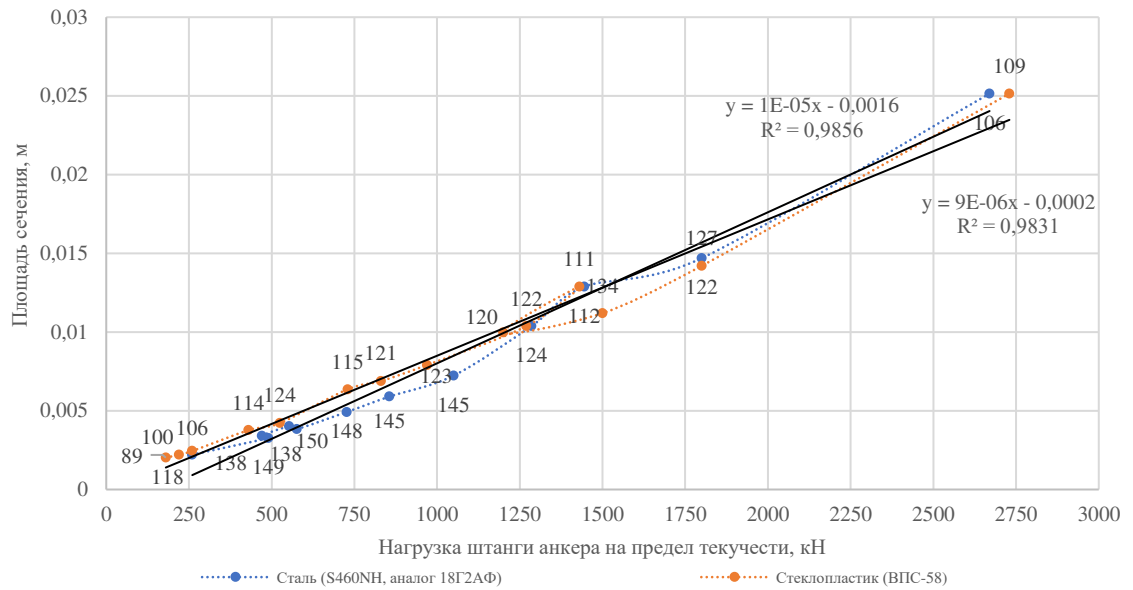


Рисунок 3.9 – Схема укрепления анкером трубошпунтовой завесы.

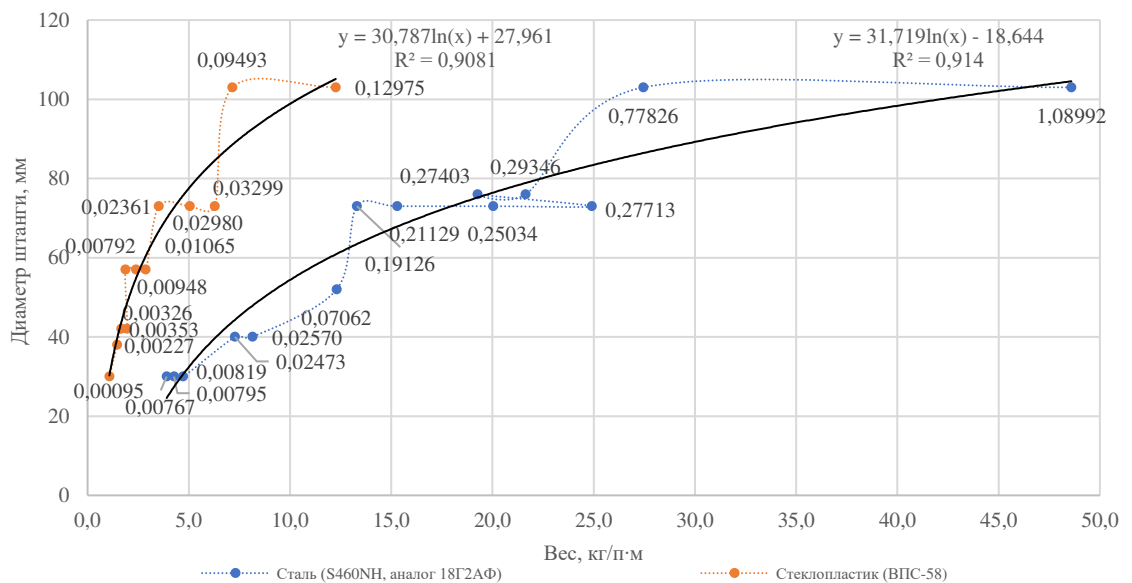
Возможность собственного изготовления трубошпунтов из полимерных нитей путем их намотки на заготовки определенного диаметра и длины значительно облегчает и упрощает процесс возведения и снижает стоимость комплексного изолирующего барьера, состоящего из трубошпунта, погруженного в колонну грунтоцементной завесы.

Как видно из данных Рис.3.10 а), б), штанги анкеров из стеклопластика практически идентичны по характеристикам штангам стальных анкеров, несмотря на отличие в плотности (сталь  $7,73 \text{ г/см}^3$ , стеклопластик  $1,95 \text{ г/см}^3$ ) и модуле упругости (сталь  $210000 \text{ МПа}$  [128], стеклопластик  $25000 \text{ МПа}$  [129, 127]). У стальной штанги параллельно увеличению внешнего диаметра с  $30 \text{ мм}$  до  $103 \text{ мм}$  увеличивается номинальная площадь сечения (с  $0,0005 \text{ м}^2$  до  $0,0062 \text{ м}^2$ ), предел

прочности материала на растяжение (с 89 МПа до 134 МПа) и показатель нагрузки на пределе текучести (с 180 кН до 2730 кН).



а)



б)

Рисунок 3.10 – Зависимости: а) площади сечения штанги анкера из стали и стеклопластика от нагрузки штанги анкера (на пределе текучести и пределе прочности), б) диаметра штанги анкера от веса штанги и жесткости её стенки.

Максимальными показателями прочности на растяжение обладают стальные штанги:

1. 40x12 ( $P_T=525$  кН,  $A_s=0,001$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=124$  МПа);

2. 103x12,5 ( $P_T=1800$  кН,  $A_s=0,0035$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=127$  МПа);
3. 76x14,5 ( $P_T=1500$  кН,  $A_s=0,0028$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=134$  МПа).

Таблица 3.3. Величины нагрузки на анкер [128, 129].

№	Материал	Тип штанги	Внешний диаметр d, мм	Внутренний диаметр d1, мм	Нагрузка на пределе текучести ( $P_T$ ), кН	Площадь сечения ( $A_s$ ), м <sup>2</sup>	Предел прочности на растяжение МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Сталь (S460NH, аналог 18Г2АФ)	30x7	30	16	180	0,000506	89
2		30x8	30	14	220	0,000553	100
3		30x9,5	30	11	260	0,000612	106
4		40x10	40	20	430	0,000942	114
5		40x12	40	16	525	0,001055	124
6		52x13	52	26	730	0,001592	115
7		73x8,5	73	56	830	0,001722	150
8		73x10	73	53	970	0,001978	147
9		73x14	73	45	1270	0,002594	122
10		73x19	73	35	1430	0,003222	111
11		76x12,5	76	51	1200	0,002492	120
12		76x14,5	76	47	1500	0,0028	134
13		103x12,5	103	78	1800	0,003552	127
14		103x26	103	51	2730	0,006286	109
15	Стеклопластик (ВПС-58)	30x8	30	14	260	0,000553	118
16		38x8	38	22	490	0,000754	148
17		42x8	42	26	470	0,000854	138
18		42x10	42	22	553	0,001005	138
19		57x6	57	45	576	0,000961	149
20		57x8	57	41	727	0,001231	150
21		57x10	57	37	856	0,001476	145
22		73x9	73	55	1050	0,001809	145
23		73x11	73	45	1285	0,002594	124
24		73x13	73	35	1445	0,003222	112
25		103x13	103	77	1800	0,003674	122
26		103x26	103	51	2670	0,006286	106

У стеклопластиковой штанги динамика зависимостей аналогична показателям стальной штанги. С увеличением номинальной площади сечения (с 0,0005 м<sup>2</sup> до 0,0062 м<sup>2</sup>) увеличивается предел прочности материала на растяжение

(с 106 МПа до 150 МПа) и показатель нагрузки на пределе текучести (с 260 кН до 2670 кН). Штанги из стеклопластика обладают более высокими показателями прочности на растяжение по сравнению со стальными штангами, максимальными показателями обладают штанги:

1. 57x8 ( $P_T=727$  кН,  $A_s=0,0012$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=150$  МПа);
2. 38x8 ( $P_T=490$  кН,  $A_s=0,0008$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=148$  МПа);
3. 57x6 ( $P_T=576$  кН,  $A_s=0,0009$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=149$  МПа).

Данные, представленные в таблице 2, приложения В и на рисунках 3.10 б), 3.11 показывают влияние диаметра штанги анкера на вес, жесткость стенки штанги и изгибающий момент в момент сопротивления.

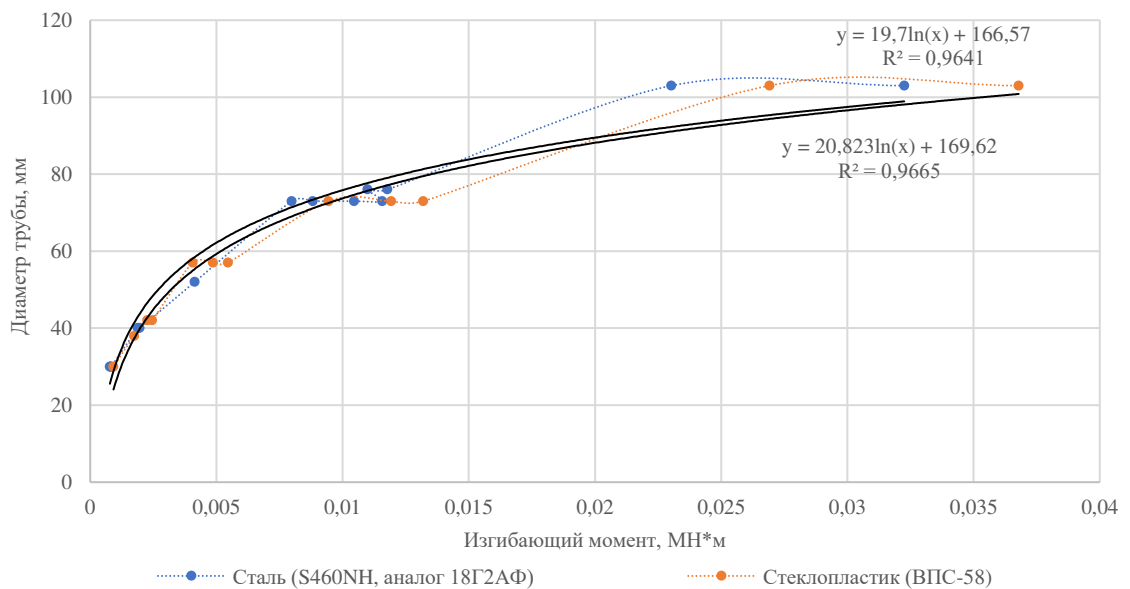


Рисунок 3.11 - Зависимость диаметра штанги анкера из стали и стеклопластика от изгибающего момента в момент сопротивления.

У стальной штанги увеличение диаметра с 30 мм до 103 мм приводит к:

- увеличению веса с 3,9 кг/п·м до 48,6 кг/п·м;
- увеличению жесткости стенки с 0,0076 МПа·м<sup>2</sup> до 1,0899 МПа·м<sup>2</sup>;
- увеличению изгибающего момента с 0,0008 МН·м до 0,0322 МН·м.

При этом у штанг размерами 40x12 мм<sup>2</sup>: ( $m=8,2$  кг/п·м,  $EJ=0,0257$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0019$  МН·м), у штанг размерами 103x12,5 мм<sup>2</sup>: ( $m=27,5$  кг/п·м,  $EJ=0,7782$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0230$  МН·м), у штанг размерами 76x14,5 мм<sup>2</sup> ( $m=21,6$  кг/п·м,  $EJ=0,2934$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0117$  МН·м).



У стеклопластиковой штанги увеличение диаметра с 30 мм до 103 мм приводит к:

- увеличению веса с 1,1 кг/п·м до 12,3 кг/п·м;
- увеличению жесткости стенки с 0,0009 МПа·м<sup>2</sup> до 0,1297 МПа·м<sup>2</sup>;
- увеличению изгибающего момента с 0,0009 МН·м до 0,0367 МН·м.

У штанг размерами 57х8 мм<sup>2</sup> ( $m=2,4$  кг/п·м,  $EJ=0,0095$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0048$  МН·м), у штанг размерами: 38х8 мм<sup>2</sup> ( $m=1,5$  кг/п·м,  $EJ=0,0023$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0017$  МН·м), у штанг размерами 57х6 мм<sup>2</sup>: ( $m=1,9$  кг/п·м,  $EJ=0,0079$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0041$  МН·м).

Требования к устройству противофильтрационной завесы. Способ погружения шпунта ПКМ и применяемое оборудование должны соответствовать технологическому регламенту и проектам организации строительства и производства работ для данного сооружения. Выбор комплекса оборудования для сооружения шпунтовой завесы производится на основе анализа совокупности исходных факторов, основными из которых являются:

- характеристики шпунта ПКМ (длина, диаметр, площадь нетто поперечного сечения, масса, длина замков);
- инженерно-геологические условия (характеристики грунтовых слоев по сопротивлению погружению и глубина забивки);
- гидрометеорологические условия (глубина грунтовых вод, колебания уровня воды);
- местные технические условия (наличие соответствующего оборудования, электроэнергии, транспортных путей и т.д.);
- принятый метод производства работ;
- принятая технология производства шпунтовых работ.

Механизация строительных и специальных строительных работ должна быть комплексной и осуществляться комплектами строительных машин, оборудования, средств малой механизации, необходимой монтажной оснастки, инвентаря и приспособлений.

Перечень основного необходимого оборудования, машин, механизмов для производства работ по погружению трубошпунта приведен в таблице 3.4.

Стандартные методы погружения шпунтов основаны на применении пневматических молотов и вибропогружателей. Рекомендуемые основные характеристики погружающих устройств приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.4. Ведомость потребности в машинах и оборудовании.

№	Основная строительная техника, инструменты	Количество, шт.
1	Стреловой кран	1
2	Вибропогружатель	1
3	Насос высокого давления	1
4	Станция миксерная	1
5	Силос для цемента	1
6	Бак для воды	1
7	Экскаватор	1
8	Инвертор сварочный	1
9	Угловая шлифовальная машина	1
1	Строп двухветвевой, Q =10,0 т	1

Таблица 3.5. Характеристики пневмомолота и вибропогружателя.

Наименование показателя	Единица изм.	Значение
Рабочая масса пневматического молота (с шлангом и адаптером)	кг	32
Уровень вибрации (виброускорение) пневматического молота	м/с <sup>2</sup>	12,8
Эксцентрикковый момент вибратора	кг·м	0,35-150
Максимальная возмущающая сила вибратора	Н	40-3600
Частота вибратора	Гц	30-40

Расчёт параметров вертикальной противофильтрационной завесы. Для объекта - пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов расчёт произведен совместно с В.Я. Шишкиным (НИИОСП им. Н.М. Герсевича), на программном средстве WALL-3 [130], в соответствии с исходными условиями разреза 2-2 (Приложение В). Исходные данные расчёта представлены в таблице 3.6.

Модель подпорной стены из трубошпунтового профиля с самозабуривающимся анкером представлена на рисунке 3.12. Расчёт произведён на

основании данных плана модульного сооружения ППЗРО, разрезов 1-1, 2-2 (Приложение В).

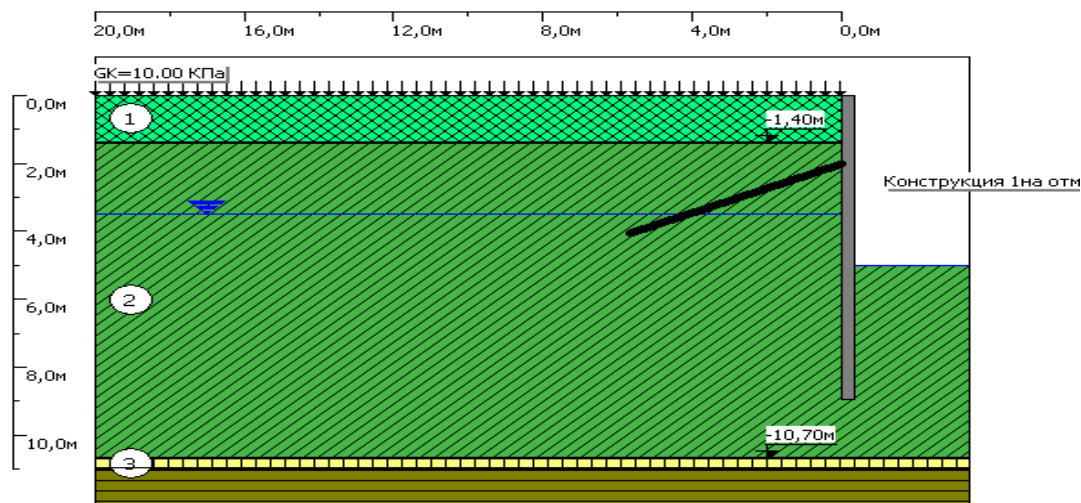


Рисунок 3.12 - Модель подпорной стены из трубного шпунтового профиля с анкером: 1 – суглинок пролювиальный, 2- суглинок алювиальный, 3 – уровень грунтовых вод.

Таблица 3.6. Исходные данные. Геометрические характеристики.

№	Геометрические характеристики	Ед. изм.	
1	2	3	4
1	Глубины котлована по этапам (м)	м	3.00 5.00
2	Глубины разделов слоев грунта	м	1.40 10.70 14.60 21.30
3	Глубина УГВ слева	м	3.50 3.50
4	Глубина УГВ справа	м	3.50 5.00
5	Глубина залегания водоупора	м	7.00
6	Тип водоупора	абсолютный	
7	Угол наклона пластов грунта (град.)	град.	0.00
8	Угол наклона стены (град.)	град.	0.00
9	Расстояние шпунт - нагрузка GK	м	1.00
10	Расстояние шпунт - нагрузка QK	м	0.00
11	Ширина нагрузки QK	м	0.00
12	Глубина приложения нагрузки QK	м	0.00
13	Расстояние анкерная плита - нагрузка PK	м	0.00

Характеристики подпорной конструкции представлены в таблице 3.7, в качестве трубошпунта в модели использован шпунт из стеклопластика диаметром 500мм, толщиной стенки 8 мм ( $m=24,1$  кг/п·м,  $E=25000$  МПа,  $EJ \sim 9,4$  МПа·м<sup>2</sup>, прогиб трубы 0,87м,  $M=0,55$  МН·м), изготовитель АО «НИИГрафит». Наличие грунтоцементной колонны не учитывалось (консервативный вариант).

Характеристики анкерных конструкций и нагрузки представлены в таблице 3.8. В качестве закрепления шпунтовой завесы к боковой стене породного массива в модели использован самозабуривающийся анкер со штангой из стеклопластика  $\varnothing 57 \times 8$  мм ( $P_T=490$  кН,  $A_s=0,0054$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=148$  МПа,  $m=1,5$  кг/п·м,  $E=25000$  МПа,  $EJ \sim 0,0023$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0017$  МН·м) [129].

Характеристики грунта представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.7. Исходные данные. Характеристики трубошпунта.

№	Характеристики трубошпунта		
1	Способ погружения	с подмывом по струйной технологии	
2	Диаметр*толщина стенки трубошпунта (мм)		500*8
3	Шаг шпунта (м)		1.00
4	Момент инерции (м**4)		0.0006
5	Модуль упругости материала шпунта (кПа)		23000000.00

Таблица 3.8. Характеристики анкерных конструкций, нагрузки [129].

№	Характеристики анкерных конструкций	Ед. изм.	Значение
1	Тип анкерных конструкций		
2	Шаг анкерных конструкций	м	1.00
3	Глубины установки	м	2.02
4	Предварительная длина	м	0.00
5	Жесткость на растяжение	кН	100000
6	Усилие натяжения	кН	400.00
7	Углы наклона к горизонту	град.	20.00
8	Длины корня анкеров	м	6.00
9	Диаметр корня анкеров	м	0.20
10	Величина избыточного давления при инъектировании цемента	кПа	1500.00
	Нагрузки		
11	Распределенная от пригрузки GK (кПа)	кПа	10.00
12	Распределенная от нагрузки QK	кПа	0.00
13	Пригрузка РК за анкерной плитой	кПа	0.00
14	Активное давление	нормальное	

Таблица 3.9. Характеристики грунта [54].

№	Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Объемный вес грунта (кН/м <sup>3</sup> )	17.40	19.90	19.90	20.50	20.60	20.50	20.50	19.70
2	Объемный вес скелета грунта (кН/м <sup>3</sup> )	11.94	15.97	15.97	16.94	17.10	16.94	16.94	15.65
3	Сцепление (кПа)	10	15	15	17	19	18	18	85
4	Угол внутреннего трения (град)	19	17	17	25	23	14	14	18
5	Коэффициент постели (кН/м <sup>2</sup> )	3500	1000	1000	6000	6000	3000	3000	5500
6	Коэффициент бокового давления грунта в покое	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.50	0.50	0.70

В процессе моделирования погружения трубошпунта контролируются следующие рассчитываемые параметры, обеспечивающие полноценный процесс погружения в грунт:

- глубина погружения;
- изгибающий момент;
- поперечная сила;
- горизонтальное давление на стенку шпунта (от веса грунта, реакция основания, результирующее давление).

Результаты моделирования по этапам строительства 1 и 2 приведены в таблицах 3.10, 3.11. Также данные таблицы подтверждают зависимости перемещения, усилий в подпорной конструкции и горизонтального давления на стену из полимерного конструкционного материала (ПКМ) шпунтов от глубины погружения, что приведено на рисунках 3.13, 3.14.

Таблица 3.10. Характеристики подпорной конструкции.

№	Характеристика подпорной конструкции	Ед. изм.	
1	2	3	4
Этап строительства 1			
1	Заглубление стены	м	6.00
2	Максимальное горизонтальное перемещение	см	2.703
3	Максимальный изгибающий момент	(кН*м)	14.05
4	Максимальная поперечная сила	кН	9.45

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4
5	Коэффициент запаса общей устойчивости		2.51
Этап строительства 2			
6	Заглубление стены	м	4.00
7	Максимальное горизонтальное перемещение	см	1.88
8	Максимальный изгибающий момент	(кН*м)	30.76
9	Максимальная поперечная сила	кН	30.85
10	Коэффициент запаса общей устойчивости		1.37

Таблица 3.11. Анкерные конструкции.

№	Характеристики	1	2	3
1	Расчетное усилие (кН)	29.54	0.00	0.00
2	Несущая способность (кН)	311.19	0.00	0.00
3	Коэффициент надежности (кН)	10.53	0.00	0.00
4	Требуемая свободная длина (м)	5.67	0.00	0.00

По данным таблицы 3, Приложения В, построена расчетная зависимость, изображённая на рисунке 3.15, из которой следует, что осадка поверхности грунта на расстоянии от завесы из шпунтов ПКМ до точки измерения, отстоящей на 10 м, составляет не более 2 мм.

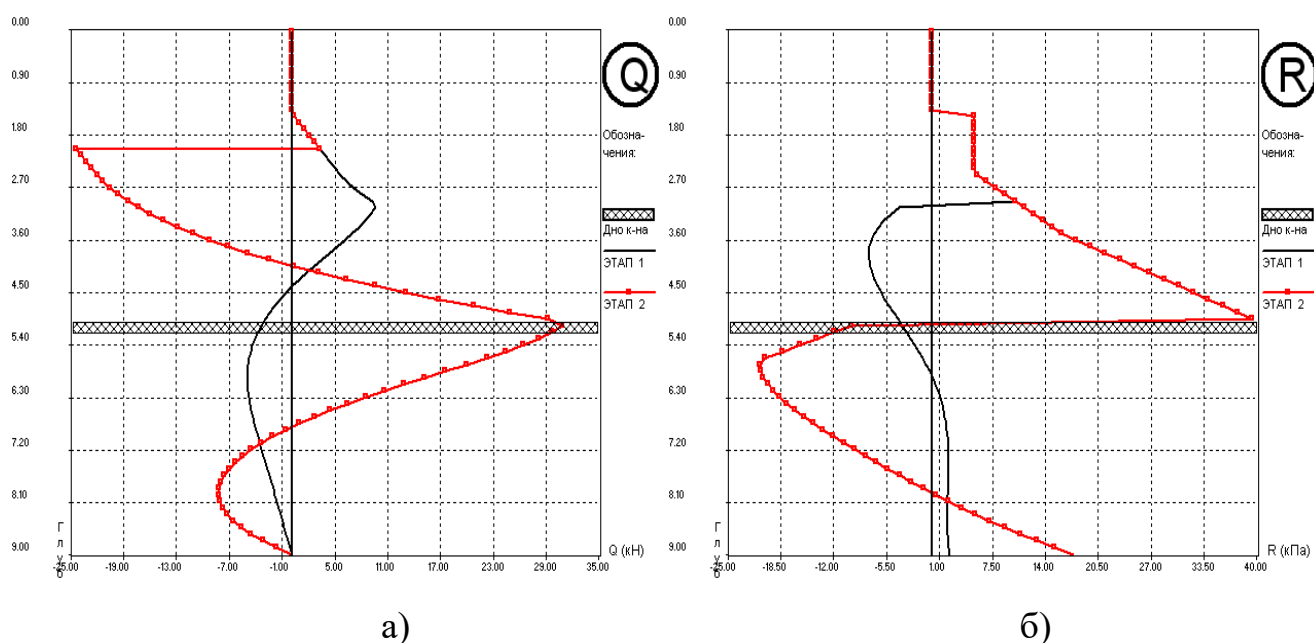


Рисунок 3.13 – Зависимости: а) перемещения (см), б) изгибающего момента (кНм) от глубины погружения шпунта. Этапы строительства 1 и 2.

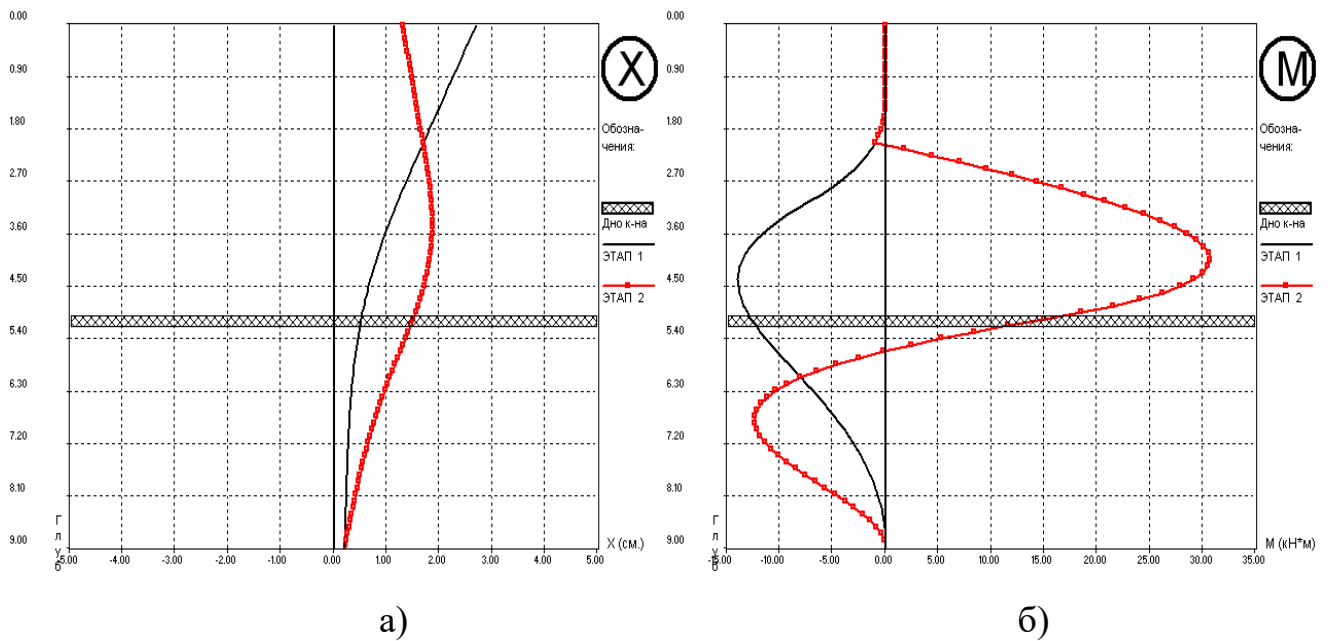


Рисунок 3.14 – Зависимости: а) поперечной силы (кН), б) результирующего горизонтального давления на стенку (кПа) от глубины погружения шпунта. Этапы строительства 1 и 2.

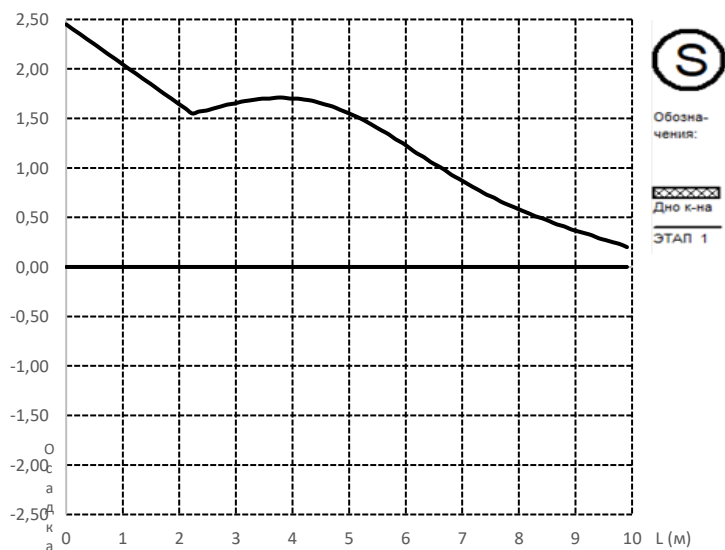


Рисунок 3.15 - Зависимость осадки поверхности от расстояния от завесы.

### 3.3. Разработка методических положений проектирования горизонтального барьера долговременной безопасности на основе противofильтрационной завесы с технологией струйной цементации с обоснованием проектных конструктивных параметров

Существующие методы укрепления грунтовых оснований. При возведении современных строительных объектов гражданского или специального назначения

возникают проблемы с показателями работы оснований, обычно это присуще при строительстве на слабых грунтах. В таблице 3.12 представлены основные методы укрепления грунтов, применяемые при реализации проектов в Российской Федерации и за рубежом.

Таблица 3.12. Методы укрепления грунтов.

№	Технология укрепления грунта	Описание технологии укрепления
1	2	3
1	Замена грунта на подушку из уплотненного песка, щебня или песчано-гравийной смеси [131]	Эвакуацию слабого грунта и замену его на малосжимаемый Материалы, применяемые для изготовления грунтовых подушек - зернистые грунты (например пески, гравий, щебень и др.), обеспечивающие модуль деформации в массиве грунтовой подушки минимум 15-20 МПа (модуль деформации слабых грунтов $\leq 5$ МПа).
2	Вертикальные дрена и пригруз территории [132]	Изготовление дрена: - песчаной – засыпка крупного, средней крупности песка в ранее подготовленную вертикальную скважину - бумажной – конструкция состоит из полимерного сердечника(пластик), на который намотан фильтрующий материал, опускается в ранее подготовленную вертикальную скважину; - синтетической, комбинированной. Возведения сооружения (насыпи). Данный способ обеспечивает увеличение модуля деформации слабых грунтов до 15-20 МПа.
3	Песчаные сваи-дрены [133]	Технология представляет собой погружение пустотелой металлической трубы с самораскрывающимся наконечником ( $\varnothing 300-400$ мм, до 20 м) с применением специализированного технологического оборудования (вибропогружатель, свайный молот). После установки пустотелой трубы в грунт, происходит засыпка насыпных материалов (песка), в технологический канал в верхней часть трубы без демонтажа технологического оборудования. Далее происходит эвакуация трубы из грунта при воздействии на неё вибропогружателя с раскрытым наконечником



Продолжение таблицы 3.12.

1	2	3
4	Уплотнение тяжелыми трамбовками (динамическое уплотнение грунта) [134]	Уплотнение производится при помощи крана-экскаватора, на стрелу которого закреплен специальный трамбовочный груз (масса 10 – 40 тонн), который поднимают на определенную высоту (5-40 м), а затем сбрасывают на уплотняемый грунт. Трамбовочный груз под массой собственного веса приобретает расчетную кинетическую энергию (25-150 кН), тем самым происходит постепенное уплотнение грунта, процедуру повторяют до достижения расчетной плотности грунта, характеристик прочности и модуля деформации.
5	Уплотнение подводными взрывами [135]	Уплотнение грунта осуществляется при помощи направленной энергии взрыва в подготовленном котловане (скважине, диаметром не менее 1,5 м), в котором размещена водяная линза толщиной от 1 до 1,5 м. Глубина уплотнения слабого грунта составит от 1 до 4 м от нижней точки котлована. Технический контроль грунта осуществляется сравнением показателей осадки поверхности и анализом показателей плотности твёрдой фазы уплотненного грунта (скелета грунта).
6	Грунтовые сваи [136]	Создание вертикальной скважины в слабом грунте путём извлечения из него ранее погруженной инвентарной сваи и дальнейшее поэтапное (послойное) заполнение с применением динамического метода консолидации зернистых (например, пески, гравий, щебень и др.) или местных грунтов.
7	Глубинное виброуплотнение [137, 138]	Вибрацию направляют в несвязанный грунт (сыпучий грунт, с плохим сцеплением между частицами), инерционные силы, исходящие от вибропогружателя (виброфлота) приводят в движение несвязанные частицы грунта и укладывают их в более плотную упаковку, что приводит к уплотнению несвязанных грунтов (плотность твёрдой фазы может составлять до 1,45-1,55 г/см <sup>3</sup> ). Подача воздуха или воды (степени важности грунта $Sr = 0,9-1,0$ ) через сопла в вибропогружателе (виброфлоте) повышает эффективность укладки несвязанных частиц в более плотную упаковку (плотность твёрдой фазы может составлять до 1,7-1,8 г/см <sup>3</sup> ).
8	Уплотнение статической нагрузкой [137, 138]	Данный способ похож на способ «уплотнения слабых водонасыщенных глинистых грунтов при использовании вертикальных дрен и пригруза территории», в нём так же создают нагрузку

Продолжение таблицы 3.12.

1	2	3
		(статическую нагрузку) на слабые грунты применением отсыпки на уплотняемой площади насыпи из зернистых грунтов (например пески, гравий, щебень и др.) или местных материалов.
9	Уплотнение грунта водо понижением [137, 138]	В осадочный грунт погружают иглофильтры (они же катоды), и металлические стержни (аноды), далее пропускают электрически ток и происходит передвижение воды к иглофильтру-катоде и эффективный коэффициент фильтрации увеличивается в 10-100 раз.
10	Метод гидроразрыва [139]	На глубину более 5 м бурятся скважины и оборудуются манжетными колоннами из стальных труб диаметрами 50-70 мм с четырьмя отверстиями диаметром 6-8 мм, расположенными обычно с шагом 330 мм. При укрепительной инъекции на небольших глубинах используют пластмассовые трубы с шагом отверстий 0,3 - 1 м. Отверстия в трубах перекрываются снаружи резиновыми манжетами, выполняющими роль обратного клапана. Пространство между грунтом и обсадной трубой заполняется обойменным раствором (на основе бентонита или глины).
11	Цементация [140]	В грунт погружают забивные инъекторы или инъекторы-тампоны (в ранее пробуренные скважины). После погружения инъектора в трубу под давлением подается чистая вода и скважина промывается, далее в трубу нагнетается цементный раствор, который, проникая в грунт, цементирует.
12	Силикатизация [141]	В грунт нагнетается силикат натрия в виде раствора (жидкое стекло), которым заполняется поровое пространство и при наличии отвердителя образуется гель, твердеющий с течением времени. Прочность на одноосное сжатие закрепленных песков и пловунов порядка 0,2 МПа, за исключением кремнефторсиликатной рецептуры, придающей прочность до 2-4 МПа, и силикатно-органических рецептур.
13	Смолизация [142]	Введении в грунт высокомолекулярных органических соединений типа карбамидных, фенолформальдегидных и других синтетических смол в смеси с отвердителями – кислотами, кислыми солями. Прочность на одноосное сжатие закрепленного карбамидной смолой песка колеблется в пределах 1-5

Продолжение таблицы 3.12.

1	2	3
		МПа и зависит в основном от концентрации смолы в растворе.
14	Глинизация [143]	Нагнетание через инъекторы, погруженные в песчаный грунт, водной суспензии бентонитовой глины с содержанием монтмориллонита не менее 60%. Глинистые частицы, выпадая в осадок и заполняют поры песка.
15	Битумизация [143]	Нагнетание через скважины в трещиноватый массив расплавленного битума или битумной эмульсии. При этом происходит заполнение трещин и пустот и массив становится практически водонепроницаемым
16	Электрохимическое закрепление [144]	Через аноды в грунт подают водные растворы солей многовалентных металлов, которые, соединяясь с глинистым грунтом, коагулируют глинистые частицы. Создаются глинистые агрегаты, сцементированные между собой гелями солей железа и алюминия. При этом прочность грунтов существенно возрастает, резко снижается их способность к набуханию. Напряжение тока при электрохимическом закреплении составляет 80-100 В, плотность тока 5-7 А/м <sup>2</sup> , расход энергии 60-100 кВт*ч на 1 м <sup>3</sup> закрепляемого грунта.
17	Термическое закрепление [145]	Через грунт в течение нескольких суток пропускают раскаленный воздух или раскаленные газы. В результате термической обработки получается упрочненный конусообразный массив грунта диаметром по верху 1,5-2,5 м, а по низу на глубине 8-10 метров около 0,2-0,4 верхнего диаметра. Образуется как бы коническая свая из обожженного непросадочного грунта с прочностью до 10 МПа.
18	Глубинного перемешивания (Deep Soil Mixing) [146, 147]	Нагнетание цемента осуществляется одновременно с вращательным погружением в грунт инъектора и смесителя. Скорость погружения инъектора и смесителя зависит от физико-механических свойств грунта, глубины погружения, объема цемента.
19	Струйная цементация грунтов (Jet-grouting) [148, 149]	Использование кинетической энергии высоконапорной суспензионной водоцементной струи, подаваемой в грунтовый массив и вращающейся в плоскости, перпендикулярной оси скважины с одновременным подъемом вверх. В результате разрушения и перемешивания грунта с цементной суспензией образуется закрепленный массив цилиндрической формы (грунтоцементная свая).

Продолжение таблицы 3.12.

1	2	3
		<p>Рабочий инструмент:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- струйный монитор с горизонтальными форсунками диаметром 0,8-3,0 мм.</li> <li>- цементная суспензия подается под давлением до 100 МПа в зависимости от метода технологии и необходимых свойств закрепленного грунта.</li> </ul> <p>Области применения струйной цементации:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- подпорные стены и ограждение котлованов,</li> <li>- усиление грунтовых оснований всех типов фундаментов,</li> <li>- противофильтрационные завесы и экраны,</li> <li>- армирование грунтов и создание геомассива,</li> <li>- закрепление грунтов при проходке тоннелей и строительстве автодорог,</li> <li>- укрепление откосов и склонов,</li> <li>- закрепление грунтов в основании проектируемых фундаментов с целью повышения прочностных и деформационных характеристик,</li> <li>- разъединительные стенки влияния деформаций,</li> <li>- цементация основания буровых свай,</li> <li>- контролируемое заполнение подземных выработок и карстовых пустот,</li> <li>- заглубление подвалов и надстройка зданий.</li> </ul>

Сравнительный анализ технологий преобразования свойств грунта. Для выбора оптимального метода укрепления грунта при сооружении ППЗРО произведён сравнительный анализ имеющихся технологий, свойств и состояния массива грунтов в результате преобразования (таблица 3.13).

Таблица 3.13. Анализ технологий преобразования свойств грунта.

Методы преобразования	Область применения	Прочность и однородность	Стоимость технологии
1	2	3	4
Замена на грунтовые подушки из щебня	Илы, текучие глинистые грунты, торфы и т.д.	Средняя	Средняя
То же из песка	То же	Низкая	Низкая

Продолжение таблицы 3.13.

1	2	3	4
Уплотнение тяжелыми трамбовками	Кроме водонасыщенных и крупнообломочных	Низкая	Средняя
Уплотнение подводными взрывами	Просадочные лессовые грунты, рыхлые песчаные и глинистые грунты	Крайне неоднородное распределение в плане	Высокая
Предварительное уплотнение оснований статической нагрузкой	Слабые водонасыщенные глинистые грунты и торфы	Низкая прочность	Низкая
То же с использованием песчаных свай	Сильносжимаемые глинистые грунты, рыхлые пески и т.д.	Низкая прочность и нет однородности	Низкая
Грунтовые сваи	Просадочные макропористые и насыпные глинистые грунты	Низкая прочность и отсутствие сплошного закрепления	Низкая
Уплотнение грунта водопонижением	Мелкие и пылеватые пески, а также глинистые грунты	Низкая прочность	Высокая
Электрохимическое закрепление	Водонасыщенные глинистые грунты	Средняя прочность	Высокая
Силикатизация	Пески, просадочные грунты	Низкая прочность нет однородности	Низкая
Смолизация	Пески всех видов	Средняя прочность и нет сплошности	Высокая
Глинизация	Пески	Низкая прочность	Высокая
Битумизация	Скальные грунты	Низкая прочность и нет однородности	Средняя
Термическое закрепление	Просадочные грунты	Средняя прочность и нет однородности	Высокая
Струйная цементация	Пески, глинистые, просадочные грунты	Высочайшие прочностные характеристики и сплошное закрепление основания	Высокая

Продолжение таблицы 3.13.

1	2	3	4
Струйная цементация	Пески, глинистые, просадочные грунты	Высочайшие прочностные характеристики и сплошное закрепление основания	Высокая
Глубинное перемешивание	Глинистые иловатые грунты, пески	Высокая прочность и нет возможности полного закрепления основания в плане	Высокая

Примечания.

1. Под низкой прочностью закрепления понимается такая степень преобразования, при которой результирующий модуль деформации менее 15 мПа. Закрепление со средней прочностью – это преобразование, при котором модуль деформации находится в пределах 16 – 25 мПа, и высокая степень закрепления – модуль деформации более 25 мПа.

2. Под низкой стоимостью преобразования грунта понимаются затраты до 3000 руб. на 1 м<sup>3</sup> преобразованного основания, а под высокой стоимостью – затраты более 10000 руб. на 1 м<sup>3</sup> основания.

3. В соответствии с требованиями норм СП 45.13330.2017 [150] для уточнения прочностных характеристик преобразованного грунта и технологии производства работ по закреплению грунтов (любого метода) необходимо выполнить опытно-производственные работы на площадке строительства.

Анализ возможных методов закрепления грунтов на площадке ППЗРО.

**Химическое закрепление или фильтрационная инъекция различных растворов.**

Инъекционное закрепление распространяется на грунты, обладающие высоким коэффициентом фильтрации, включая песчаные, крупнообломочные, а также просадочные лессовые грунты. Разработано и применяется несколько химических способов закрепления грунтов: цементация, глинизация, битумизация, силикатизация, смолизация, электрохимическое закрепление. В связи с наличием суглинков с очень малым коэффициентом фильтрации, химическое закрепление

грунтов основания всех сооружений ППЗРО выполнить нельзя, т.к. невозможно обеспечить гарантий, соответствующих требованиям к прочности и модулю деформации грунта в потенциальных условиях высоких грунтовых вод.

**Гидроразрыв, манжетная цементация.** В соответствии с п.3.13 СП 45.13330.2017 «Гидроразрыв: Образование трещин в массиве грунта при инъекции растворов.» [150]. При этом нет гарантий, что раствор в трещине не утечет в менее нагруженные области вне фундамента. При гидроразрыве не обеспечивается единая сплошность закрепления массива, поэтому нет возможности гарантировать требуемую скорость распространения поперечных волн, поскольку в основании могут быть области менее прочного грунта, в которых скорость распространения поперечных волн гораздо ниже.

**Уплотнение грунтовыми или бетонными сваями (НСВ).** В связи с высокой сейсмической нагрузкой требуется обеспечить сплошное однородное закрепление грунтов. Невозможно сплошное преобразование массива с обеспечением высокой требуемой прочности грунта основания всех модульных сооружений ППЗРО.

**Буромесительный способ.** Буромесительный способ возможно использовать в песчаных и глинистых грунтах, за исключением крупнообломочных, гравелистых песков. Требуется импортное оборудование, в России технология недостаточно распространена.

**Уплотнение грунта водопонижением.** Уровень грунтовых вод опускают ниже минимальной отметки дна модульного сооружения ППЗРО.

**Предварительное уплотнение оснований статической нагрузкой,** связанное с процессом консолидации – уплотнением грунтового массива по мере вытеснения из него воды, является невозможным в рамках площадки ППЗРО ввиду довольно высокого уровня грунтовых вод, находящегося под нижней отметкой ППЗРО.

**Уплотнение укаткой, трамбующими машинами и тяжелыми трамбовками.** Применяются при замене грунта в котловане на уплотненные гравийные или песчаные подушки. Выемка грунта и его замена является не

целесообразной ввиду того, что модульные сооружения ППЗРО уже заглублены на 1/3 своей высоты ниже уровня земли. Замена грунта основания под модульным сооружением ППЗРО приведет к дополнительным объемам вынимаемого грунта, затратам и увеличению сроков сооружения.

**Струйная цементация.** Технология струйной цементации представляет собой сооружение колонн из грунта и цемента в процессе перемешивания грунта с цементным раствором, выполняется в два этапа: процесс прямого хода буровой колонны (бурение лидерной скважины), процесс обратного хода буровой колонны (в форсунки на буровой головке подают цементный раствор при давлении ~45-50 МПа, размывающий грунт вокруг скважины, и производят медленный подъем буровой колонны с вращением, Рис.3.16) [150].

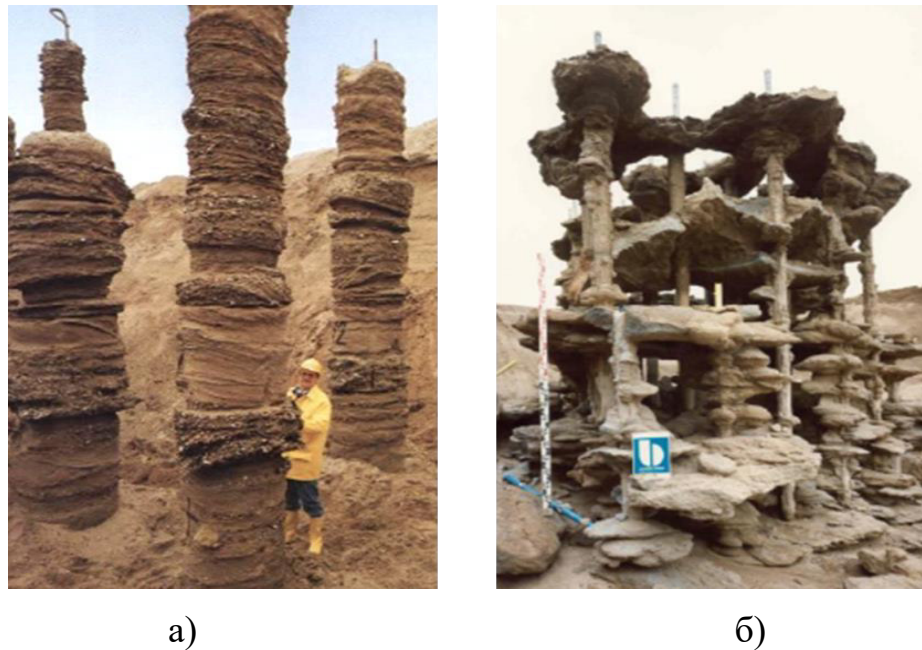


Рис. 3.16. Образование в массиве горных пород: а) грунтоцементных колонн технологией струйной цементации, б) цементных форм при инъекционном упрочнении пород [151].

Комплекс оборудования, применяемого при возведении противодиффузионной завесы технологией струйной цементации представлен на рисунке 3.17.





Рисунок 3.17. - Комплекс оборудования для производства колонн по технологии струйной цементации: 1 - склад силосный для хранения цемента, 2 - ленточный конвейер, 3 - смесительный растворный узел, 4 - насос высокого давления, 5 - буровая установка, 6 - грязевой насос, 7 - компрессор, 8 - дозатор для подачи добавок к вяжущему [152].

Данный способ снижает фильтрацию в грунтах до нуля, но требует вывоза и утилизацию грунтоцементного шлама. Объем грунтового шлама при устройстве противофильтрационных завес в обводненных грунтах может достигать такого же количества, как и объем закрепляемого грунтового массива. Утилизация шлама представляется затруднительной и экономически не целесообразной, поэтому необходимо использовать превенторы.

Превенторы – гидромеханические изделия из категории обязательного вспомогательного противовыбросового бурового оборудования, которые выполняют функцию герметизации устья скважины в целях предотвращения разлива раствора и пульпы на дневную поверхность [153].

Для установки превентора предварительно выполняется струйная цементация верхнего слоя толщиной 1 метр и радиусом в 2 раза больше, чем проектируемая противофильтрационная завеса.

В соответствии со сводами правил [154-156] областью применения струйной технологии являются практически все грунты, кроме скальных, отсутствуют исследования по струйной цементации шламонакопителей и хвостохранилищ.

### **3.4. Блок-схема алгоритма расчета технологических параметров горизонтальной противифльтрационной завесы с технологией струйной цементации**

Последовательность работ при устройстве ПФЗ из армированных грунтоцементных элементов [157]:

- подготовительные работы (разбивка геодезической сети и привязка ПФЗ на местности, устройство дорог, ограждения, установка оборудования);
- устройство слоя грунтоцемента толщиной 1 м диаметром 1,6 м на глубине 0,6 м для установки превентора;
- после набора прочности не менее 5 МПа грунтоцемента выполняется его разбуривание долотом диаметром 132 мм и установка сальника превентора;
- бурение лидерной скважины диаметром 90 мм ведётся буровой установкой, например, MDT180B до расчётной глубины, на 1 м глубже принятой глубины стены в грунте (прямой ход);
- после достижения проектной отметки производится подъём буровой колонны с вращением и одновременной подачей раствора под давлением до 50 МПа, давление создаёт насос высокого давления НВД, например, Tescniwell TW 352 (обратный ход);
- смешивание раствора с добавками для струйной цементации (КДСЦ) производится при помощи миксерной станции СМ-80/200 «Вихрь» (производительность  $25\text{ м}^3/\text{ч}$ ) и манжетных дозаторных насосов типа НД. Для увеличения плотности, водонепроницаемости получаемого грунтоцемента, снижения коэффициента фильтрации до значения  $1 \cdot 10^{-5}$  м/сут делается добавка жидкого стекла. Подача необходимого цемента ведётся при помощи транспортировочного шнека из силоса для цемента объёмом более  $25\text{ м}^3$ . Добавки используются для повышения водостойкости, водонепроницаемости противифльтрационной завесы (ПФЗ) [123]. Добавка включает гидроксид кальция и карбонат натрия, сульфат кальция и метил и/или этил, силиконат натрия и/или калия. Содержит одну или более связей углерода с кремнием. Комплексная добавка дополнительно может содержать 0,9-1,8 мас % нитрата натрия. Метил и/или этил

силиконат натрия и/или калия используют в твердом виде (порошок СИАКОР) или в жидком виде (кремнийорганические жидкости ГКЖ-10 и/или ГКЖ-11). Технический результат - снижение водопоглощения, повышение прочности и увеличение диаметра грунтоцементных колонн по струйной технологии [123].

Комплексная добавка струйной цементации (КДСЦ) обеспечивает:

- прочность грунтоцемента – не менее 3 МПа,
- удельное сцепление грунтоцемента – не менее 0,5 МПа,
- угол внутреннего трения – не менее  $43^\circ$ ,
- модуль деформации – не менее 320 МПа.

Весь процесс можно разбить на три этапа [157]:

- подъём бурового става. Подъём осуществляется в автоматическом режиме, причём не плавно, а ступенчато («рывками»). Продолжительность одного «рывка» 4-6 секунд;
- перехват сквозного редуктора. Перехват выполняется следующим образом: зажим нижними тисками штанги бурового става, разжим кулачков редуктора, опускание редуктора вниз, зажим бурового става кулачками редуктора, разжим нижних тисков (при этом верхние тиски постоянно обжимают буровой став через деревянные прокладки);
- подъём бурового става в автоматическом режиме с учётом «рывка».

Процесс приготовления раствора на миксерной станции прекращается за некоторое время до завершения изготовления грунтоцементного элемента. Это позволяет израсходовать весь приготовленный и накопленный за цикл раствор.

После окончания подачи раствора буровой став поднимается и на высоте 30 см над поверхностью земли отсоединяется.

Производится промывка бурового комплекса водой, подаваемой по рукавам высокого давления (РВД) при помощи насоса высокого давления (НВД). Комплекс подготавливается к устройству новой грунтоцементной сваи.

Буровая установка отъезжает от готовой грунтоцементной сваи и перемещается к точке бурения новой скважины.

В результате этих операций должен быть получен грунтоцементный элемент (ЦГЭ, колонна) jet 1, колонна диаметром 800 мм. Специальные мероприятия по уходу за бетоном не требуются.

Колонна jet1 диаметром 800 мм выполняются в три ряда с шагом 700 мм между рядами и 600 мм между соседними колоннами в рядах в шахматном порядке (фрагмент плана ПФЗ, приложение В). Соседние колонны выполняются после набора прочности не ранее, чем через 48 часов (Рис. 3.18, а,б).

Отклонения в плане и по глубине расположения колонны не должны превышать 50 мм.

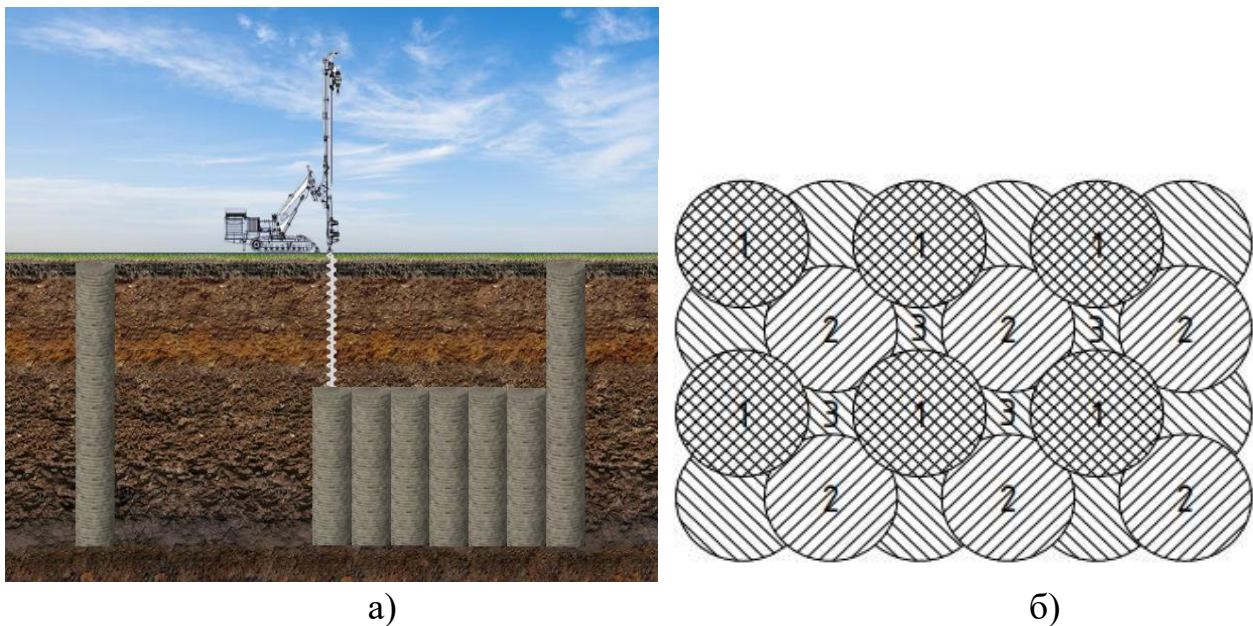


Рисунок 3.18. - Создание грунтоцементной горизонтальной завесы – плиты из колонн струйной цементации, на определенной глубине, перед выемкой породы для котлована под здание модульного сооружения ППЗРО: а) общий принцип создания грунтоцементной завесы, б) последовательность выполнения этапов создания грунтоцементной «плиты» методом струйной цементации.

Скорость подъема монитора должна быть не менее 4 сек на интервал (4 см). При этом скорость вращения – 30 оборотов в минуту или 3 оборота на интервал (4 см). Расход цемента при закреплении грунтов основания следует принять в среднем 600-650 кг на 1м<sup>3</sup>. Фактический расход цемента при формировании 1 пог. м

грунтоцементных элементов уточняется при производстве работ на опытном участке.

Излив пульпы на поверхность котлована категорически запрещен. После промывки оборудования в конце смены раствор добавляется в слой грунтоцемента для установки превентора.

Требования к устройству противофильтрационной завесы. Расчеты и проектирование ПФЗ выполняются в соответствии с требованиями СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» [156].

Укрепленный грунт должен представлять собой горизонтальную плиту в грунте, толщиной не менее чем 4 м, расположенную ниже основания модульного сооружения, по его площади, с однородными в плане и по глубине свойствами со следующими характеристиками:

- модуль деформации 100 МПа;
- расчетное сопротивление по прочности на сжатие не менее 1,4 МПа.

Расчет параметров технологии струйной цементации. Наиболее важным параметром, определяющим конечную эффективность струйной цементации, является количество цемента (в сухом состоянии), содержащегося в 1 м<sup>3</sup> укрепленного грунта. Именно данный параметр определяет прочность материала грунтоцементных колонн и их фильтрационные свойства.

В условиях отсутствия общего стандарта под данным параметром часто понимают количество цемента, а иногда даже цементного раствора, израсходованного при цементации 1 м<sup>3</sup> грунта.

Между этими показателями существует различие. При устройстве грунтоцементных колонн с помощью струйной цементации происходит значительный выход грунтоцементной пульпы с высоким содержанием цемента.

Другой задачей является контроль величины фактического водоцементного отношения раствора, при котором происходит реакция гидратации цемента. В грунтовой массе впрыскиваемый цементный раствор смешивается с водой, содержащейся в грунте. При этом происходит разбавление смеси водой и снижение

прочностных и других свойств материала грунтоцементных колонн. В приложении В, таблицы 4-5, приведены результаты расчёта цемента (или цементного раствора) для устройства колонн с проектным содержанием цемента на 1 м<sup>3</sup> грунта. На рисунке 3.19 представлено дерево расчёта (блок-схема алгоритма) технологических параметров струйной цементации для двух инженерно-геологических элементов, соответствующих разрезу 2-2 (приложение В).

Для определения оптимальных технологических параметров производства грунтоцементных элементов (ЦГЭ) произведен анализ факторов, влияющих на плотность получаемого грунтоцемента. Расчёты производились с учётом разного водоцементного отношения (от 0,7 до 1,0), плотности портландцемента (3,1 т/м<sup>3</sup> и 1,6 т/м<sup>3</sup>), диаметров ЦГЭ (0,8 м, 1,0 м).

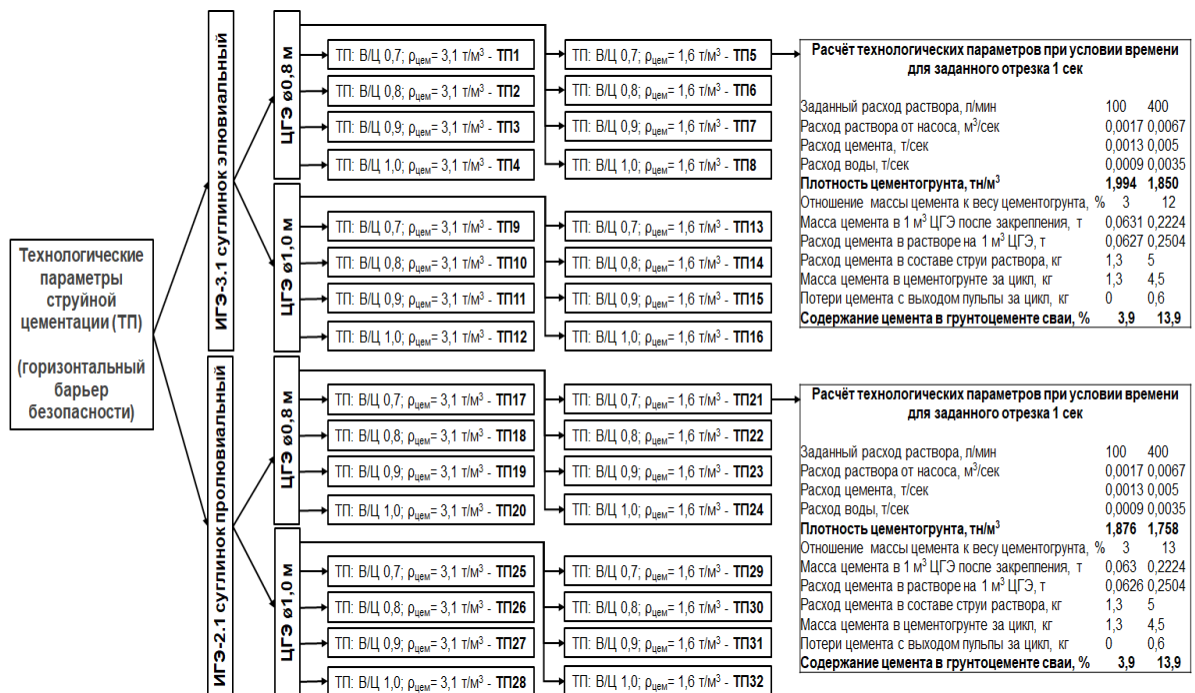


Рисунок 3.19 - Дерево решений (блок-схема алгоритма) по расчёту технологических параметров струйной цементации для площадки ППЗРО: двух инженерно-геологических элементов (ИГЭ2.1 – грунт пролювиальный, ИГЭ3.1 – грунт элювиальный), двух диаметров грунтоцементных элементов (ЦГЭ, колонны), двух видов плотности цемента и разного водоцементного отношения.

Данные из таблиц 4 и 5 Приложения В, рисунков 3.20 и 3.21 представляют похожую динамику изменения плотности получаемого грунтоцемента от

водоцементного отношения вне зависимости от типа грунта (ИГЭ). На уровень плотности в колонне 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.

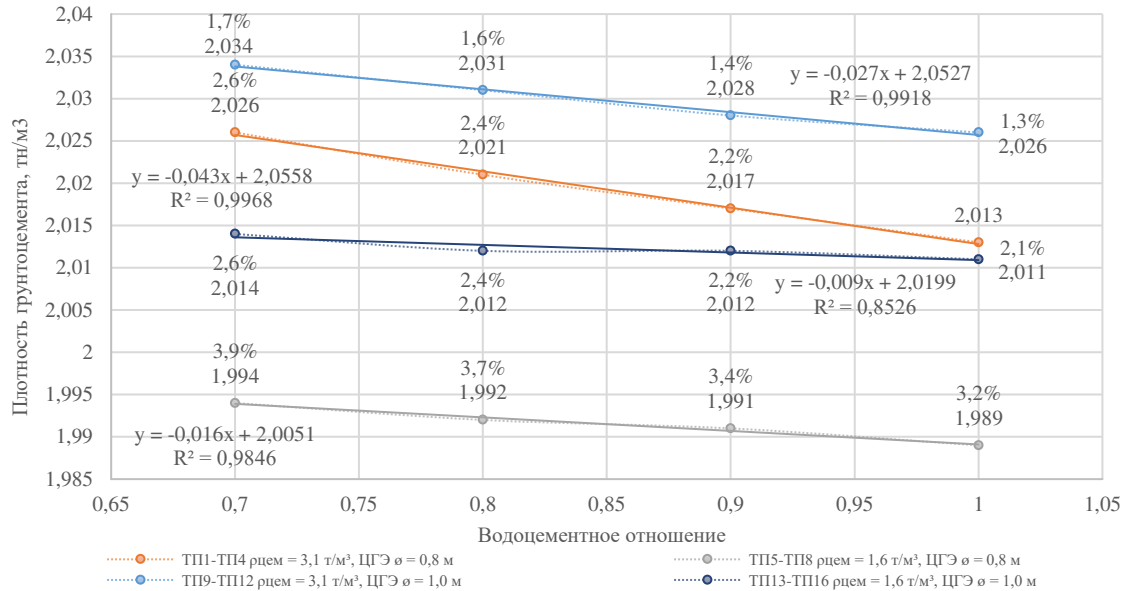


Рисунок 3.20 - Зависимости плотности грунтоцемента от водоцементного отношения (время для заданного отрезка высоты 1 сек, расход раствора 100 л/мин (1,7 л/сек)) для условий ИГЭ 2.1 (грунт пролювиальный)

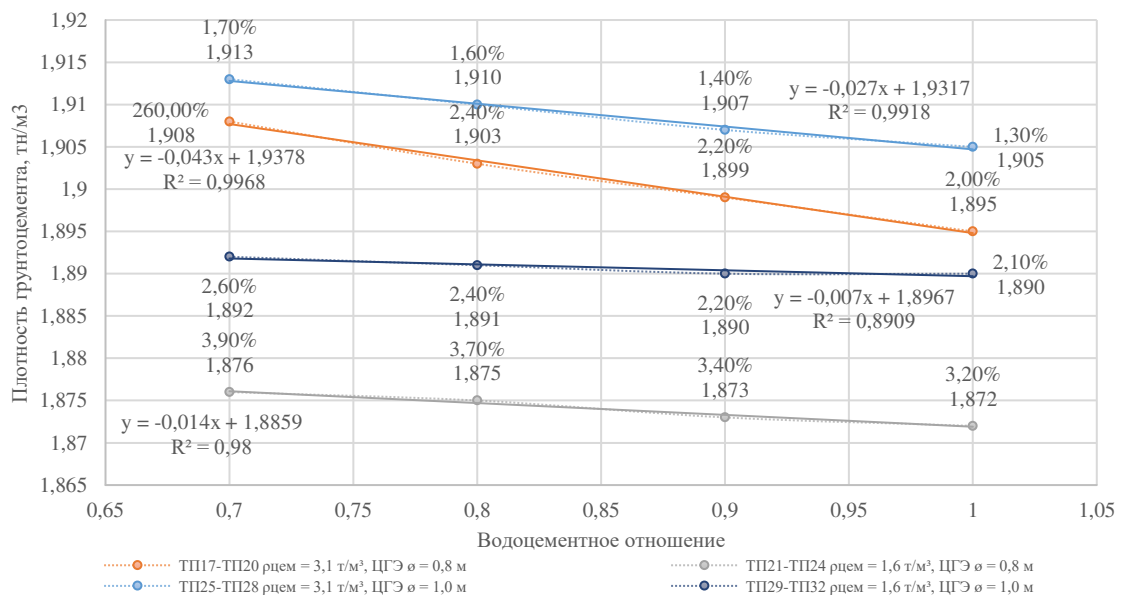


Рисунок 3.21 - Зависимости плотности грунтоцемента от водоцементного отношения (время для заданного отрезка высоты 1 сек, расход раствора 100 л/мин) для условий ИГЭ 3.1 (грунт элювиальный).



Из рисунков 3.20 и 3.21, таблиц 2.14, 4 Приложения В, видно, что увеличение диаметра колонны с 0,8 до 1 м приводит к увеличению плотности грунтоцемента в условиях заполнения заданного отрезка высоты укрепляемого массива колонны:

- ИГЭ 2.1 увеличение составляет 0,4-0,65% (при В/Ц= 0,7-1,0,  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$ ), 1-1,1% (при В/Ц= 0,7-1,0,  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$ );
- ИГЭ3.1 увеличение составляет 0,25-0,5% (при В/Ц=0,7-1,0,  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$ ), 0,85-1,0% (при В/Ц=0,7-1,0,  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$ ).

Однако, если проанализировать показатели содержания цемента в грунтоцементе производимой сваи, то 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,  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$ ), а также с 3,2-3,9% до 2,1-2,6% (при В/Ц= 0,7-1,0,  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$ ).

Изменение плотности цемента в колонне с ИГЭ 2.1 и 3.1 в расчётах с  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$  (истинная плотность портландцемента) на плотность  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$  (насыпная плотность портландцемента) приводит к понижению показателя плотности колонны диаметром  $\varnothing 0,8\text{м}$  на 1,2-1,6%, колонны с диаметром  $\varnothing 1,0\text{м}$  - на 0,8-1,1% и увеличению содержания цемента в грунтоцементной колонне в 1,5 раза.

Влияние водоцементного отношения в растворе также является одним из ключевых факторов, влияющих на показатель плотности колонны, и как следствие, на содержание цемента в ней. В ИГЭ 2.1 и 3.1 с понижением В/Ц происходит небольшое увеличение плотности грунтоцемента.

У колонны диаметром  $\varnothing 0,8 \text{ м}$ , при плотности  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$  плотность грунтоцемента изменяется от 0,2% (В/Ц=1,0) до 0,7% (В/Ц= 0,7), при плотности  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$  от 0,05% (В/Ц= 1,0) до 0,2% (В/Ц= 0,7).

У колонны диаметром  $\varnothing 1 \text{ м}$ , плотности  $\rho_{\text{цем}} = 3,1 \text{ т/м}^3$  плотность грунтоцемента изменяется от 0,1% (В/Ц= 1,0) до 0,4% (В/Ц=0,7), при плотности  $\rho_{\text{цем}} = 1,6 \text{ т/м}^3$  плотность грунтоцемента изменяется 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 с диаметрами  $\varnothing 0,8$  м и  $\varnothing 1$  м, с плотностью  $\rho_{\text{цем}} = 3,1$  т/м<sup>3</sup>, и плотностью  $\rho_{\text{цем}} = 1,6$  т/м<sup>3</sup> в обоих ИГЭ.

Из данных таблиц 2.14, 4 Приложения В следует, что показатель расхода раствора также влияет на показатели плотности колонны и содержание цемента в ней. Увеличение расхода раствора со 100 до 400 л/мин не приводит к полноценному увеличению содержания цемента в грунтоцементе колонны, так как происходят потери цемента с выходом пульпы за цикл обработки заданного отрезка высоты укрепляемого массива колонны. Из данных таблиц видно, что с увеличением расхода цемента в составе струи раствора происходит увеличение отношения массы цемента к весу грунтоцемента (2-4% при 100 л/мин и 7-15 при 400 л/мин), также увеличиваются потери цемента с выходом пульпы за цикл и составляют от 0,2 (5%) до 0,7 (12%) кг при том, что масса цемента в грунтоцементе за цикл составляет от 3,9 до ~6 кг. Содержание цемента в грунтоцементе колонны увеличивается в среднем в 3,5-3,7 раза в зависимости от водоцементного отношения.

Задачей анализа технологических параметров и влияющих факторов является определение оптимальных технологических параметров производства грунтоцементных элементов (ЦГЭ, колонны) в условиях ИГЭ 2.1 и 3.1.

Из данных таблицы 4 Приложения В наиболее подходящими параметрами обладает набор технологических параметров ТП5 для ИГЭ 2.1, из данных таблицы 5 Приложение В – набор - ТП21 для ИГЭ 3.1. Они обладают максимальными показателями содержания цемента в грунтоцементе колонны, оптимальными расходами цемента в растворе на 1 м<sup>3</sup> колонны (0,051-0,063 кг), наличием цемента в составе струи раствора (1-1,3 кг), стабильными средними показателями отношения массы цемента к весу грунтоцемента (3%) и потерями цемента с выходом пульпы за цикл ~0,5 кг.

Определение расхода цемента для грунта ИГЭ 2.1. Руководствуясь минимальными потерями цемента, необходимо принять максимальную скорость

подъема монитора – 4 сек на 4 см, это 60 см в минуту. При этом, как показано в таблице 6 Приложения В, в грунтоцементе остается 3,9% цемента за 1 сек, следовательно за 4 сек остается 15,6% цемента. Для глинистого грунта этого недостаточно.

Согласно рисунку 3.22 для ИГЭ 2.1 и 3.1 необходимо содержание цемента в грунтоцементе не менее 40%, для обеспечения прочности  $R=3,2 - 4,0 \text{ МПа} = 32 - 40 \text{ кгс/см}^2$  [157]. Это возможно при времени цикла, равном 22 сек. Кроме того, необходимо обеспечить минимальное количество потерь цемента в шламе.

Как показано на рис.2.23, с увеличением времени цикла, равном 22 сек., потери цемента растут.

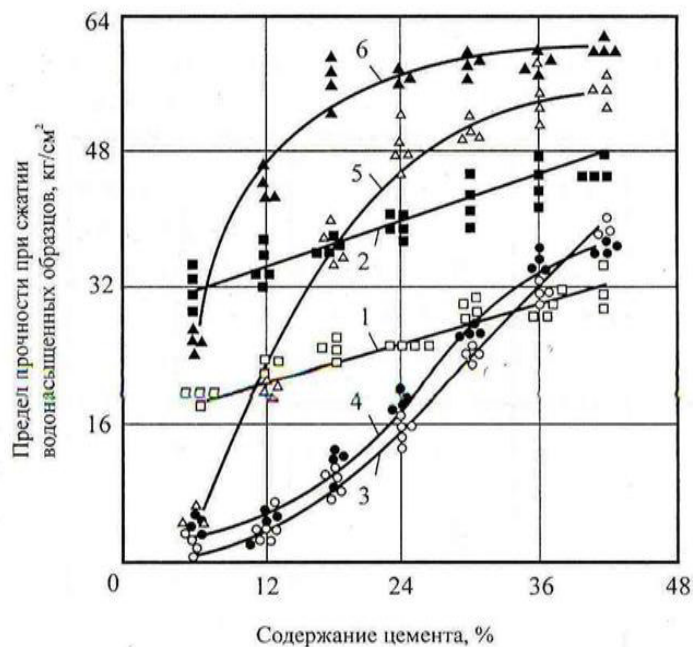


Рисунок 3.22 - Прочность грунтоцемента при установке завесы технологией струйной цементации в глинистых грунтах [157]: 1 - прочность грунтоцементных образцов из каолиновой глины после 28 суточного твердения; 2 - прочность образцов из каолиновой глины после 120-суточного твердения; 3 - прочность образцов из монтмориленовой глины после 28-суточного твердения; 4 - прочность образцов из монтмориленовой глины после 120-суточного твердения; 5 - прочность образцов из гидрослюдистой глины после 28-суточного твердения; 6 - прочность образцов из гидрослюдистой глины после 120-суточного твердения.

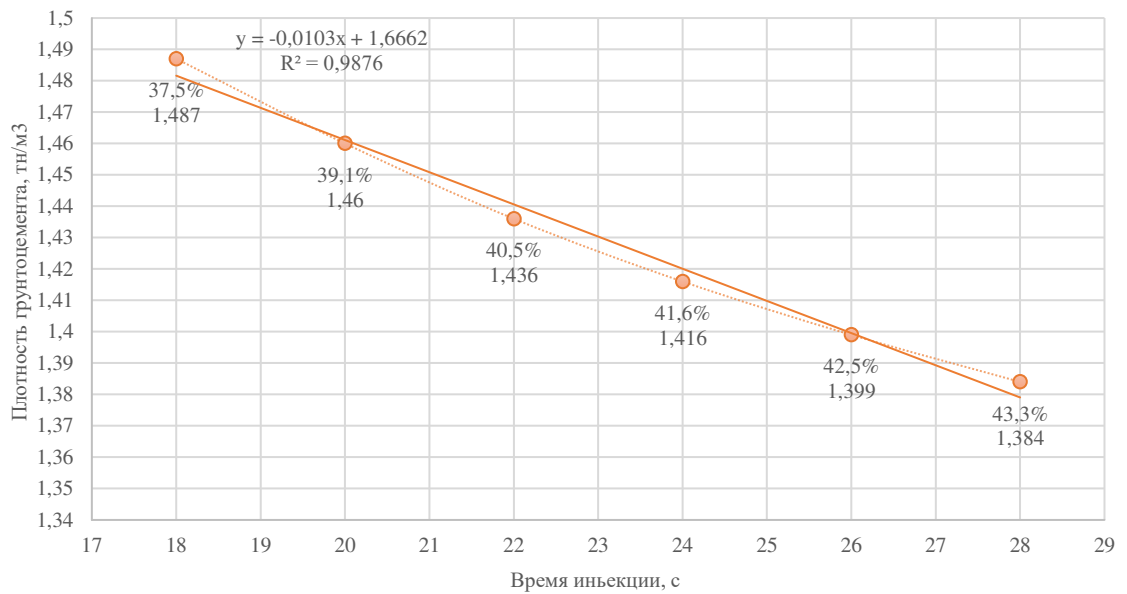


Рисунок 3.23 - Зависимость плотности грунтоцемента (т/м³) от времени подъема монитора за цикл - 4 см высоты колонны для ИГЭ 2.1.

Принимаемые (контролируемые) значения технологических параметров для работы в слое ИГЭ 2.1:

- расход цемента на 1 м³ грунтоцементной сваи – 1377 кг, или 688,5 кг на погонный метр колонны диаметром 0,8 м;
- водоцементное отношение – 0,7;
- расход инъекционного раствора на погонный метр – 0,5 м³ (при плотности раствора 1436 кг/м³);
- выход пульпы – 0,00091 м³ = 0,09 л (превентор должен предотвратить выход шлама);
- давление подачи инъекционного раствора, МПа - 30 – 60;
- расход инъекционного раствора, л/мин – 100;
- диаметр сопла, мм, 1,5 - 3,0;
- скорость вращения, об/мин, 30;
- время для заданного отрезка высоты 4 см – 22 сек. (скорость подъема монитора – 10 – 11 см/мин).

По результатам расчетов (таблица 6 приложения В) построены графики изменения расхода цемента от времени подъёма монитора, изменения расхода

цемента в составе струи раствора, в грунтоцементе и потери цемента с выходом пульпы за цикл - 4 см подъема монитора струйной цементации (рис. 3.24).

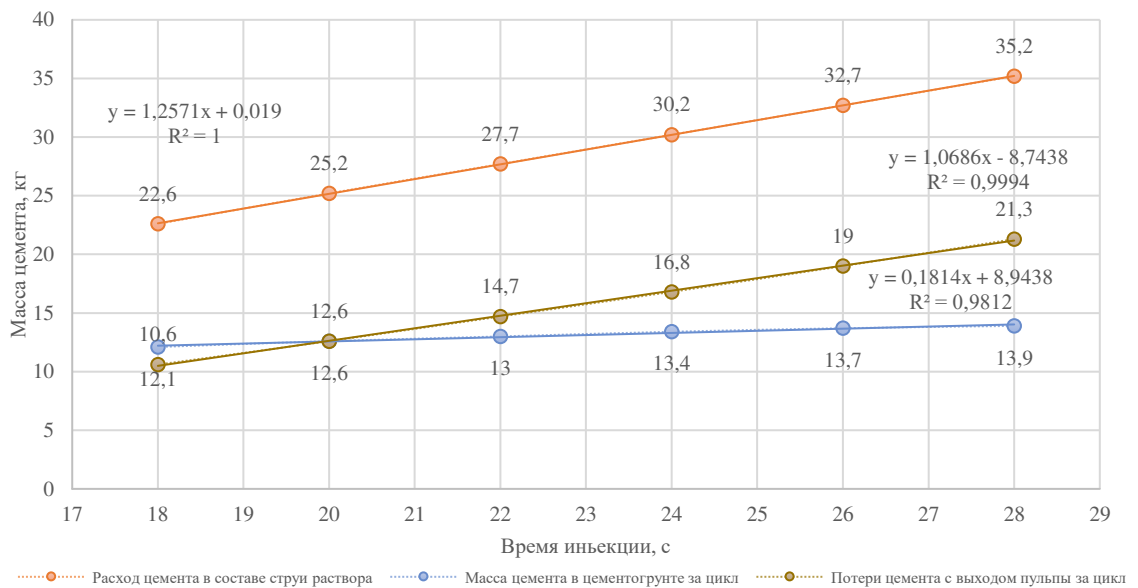


Рисунок 3.24 - Зависимости расхода цемента (кг) от времени подъема монитора за цикл (4 см высоты) колонны для ИГЭ 2.1.

В зависимостях, приведенных на рисунке 4.8, данных таблицы 6 Приложения В, показано влияние времени инъектирования на показатели плотности получаемого грунтоцемента. Увеличение времени обработки заданного отрезка колонны на 2 сек приводит к понижению плотности на 0,015-0,027 т/м<sup>3</sup>, задержка на 10 сек приводит к понижению плотности на 0,103 т/м<sup>3</sup>, с 1,487 т/м<sup>3</sup> до 1,384 т/м<sup>3</sup>. Это обусловлено тем, что при увеличении времени перемешивания (задержки) увеличивается объем воды, поступившей с раствором, но, несмотря на это, объем поступившего цемента в колонне увеличивается с ~37% до ~43%.

Зависимость, представленная на рисунке 3.24 указывает на процесс симбатного увеличения расхода поступившего цемента в составе струи практически в 1,5 раза (с 22,6 кг до 35,2 кг), массы цемента в грунтоцементе на ~15%, (с 10,6 кг до 13,9 кг), потере цемента с выходом пульпы на 0,5-2 кг при задержке инъектирования на 2 сек, потере цемента на 9 кг при задержке инъектирования на 10 сек.

Из данных таблицы 6 Приложения В и рисунков 3.22 - 3.24 можно сделать

вывод, что оптимальное время задержки монитора при инъецировании грунта составляет 22 сек. Данное время обеспечивает требования в соответствии с рис. 3.23 по содержанию цемента в колонне (40,5%), плотности колонны (1,436 т/м<sup>3</sup>).

Опытно-производственные работы для обоснования расчетных технологических параметров струйной цементации. В соответствии с требованиями СП 45.13330.2017 [150] до начала основных работ необходимо выполнить опытно-производственное уточнение параметров на опытных площадках. Параметры – давление, подача раствора, скорость вращения и скорость подъема – должны уточняться непосредственно на объекте.

Технологические параметры определяются по методике: Патент РФ №2461682 «Способ определения диаметров колонн, возводимых в грунте методом струйной геотехнологии».

Последовательность определения параметров струйной цементации:

1. С помощью грунтоотборника специальной конструкции производится отбор грунта ненарушенной структуры [158];

2. Грунтоотборник устанавливается на калибратор, (Рис. 3.25), [158]. Конструкция калибратора включает в себя следующие элементы: грунтозаборник (1), представляющий собой разборный колонковый буровой инструмент, задавливаемый буровой установкой (любым из методов, позволяющих отобрать грунт ненарушенной структуры) и в дальнейшем извлекаемым на поверхность при наполнении грунтом (длина грунтозаборника зависит от требуемого радиуса колонны; кондуктор (7), выполненный из металлической трубы для дальнейшей установки в него перпендикулярно грунтозаборника для размыва гидромонитором образца грунта; крышки, снабженной датчиком для определения давления, возникающего в грунте при его размыве и устанавливаемой в конце грунтозаборника после его монтажа в кондуктор.

3. Производится опытный размыв с фиксацией следующих параметров: диаметр отверстия в форсунке, давление смеси, скорость вращения.

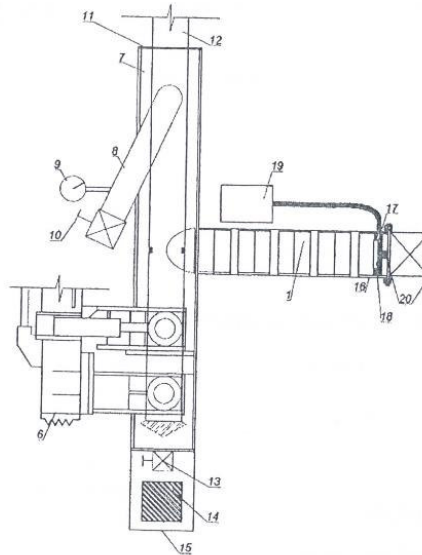


Рисунок 3.25 - Калибратор для подбора технологических параметров струйной цементации [158].

4. По результату опытного размыва, по секундомеру устанавливается время, необходимое для формирования свай требуемого диаметра – на основании этого устанавливается скорость подъема бурового става. Отношение (приведенного по площади к квадрату) сечения круглого пробоотборника диаметра  $d$  образца к полученному отрезку времени  $T$  является скоростью подъема монитора  $U$  для закрепления исследуемого образца грунта при заданной скорости вращения и других параметрах струйной цементации (Jet grouting) [158]:

$$U = \frac{\sqrt{\pi} \cdot d}{2 \cdot T},$$

Для установок, скорость подъема в которых устанавливается временем размыва слоев с постоянным шагом, требуемое время получают отношением скорости подъема  $U$  к величине шага.

Определение расхода цемента для грунта ИГЭ 3.1. Аналогичные расчеты тем, что выполнены для грунта ИГЭ 2.1, выполняются для ИГЭ 3.1, (суглинок пролювиальный), приведены в таблице 7 Приложения В.

Принимаемые (контролируемые) значения технологических параметров для работы в слое ИГЭ 3.1:

- расход цемента на 1 м<sup>3</sup> грунтоцементной сваи – 1439 кг или 719,5 кг на погонный метр ЦГЭ диаметром 0,8 м;
- водоцементное отношение – 0,7;
- расход инъекционного раствора на погонный метр – 0,5 м<sup>3</sup> (при плотности раствора 1426 кг/м<sup>3</sup>);
- выход пульпы 0,00099 м<sup>3</sup> = 0,1 л (превентор должен предотвратить выход шлама);
- давление подачи инъекционного раствора, МПа - 30 – 60;
- расход инъекционного раствора, л/мин – 100;
- диаметр сопла, мм -1,5 - 3,0;
- скорость вращения, об/мин -30;
- время для заданного отрезка высоты 4 см – 23 сек. (скорость подъема монитора – 10 см/мин).

По результатам расчетов (таблица 7 приложение В) построены графики (рис. 3.26) изменения расхода цемента от времени подъема монитора, (рис. 3.27) изменения расхода цемента в составе струи раствора в грунтоцементе и потери цемента с выходом пульпы за цикл – 4 см подъема монитора струйной цементации.

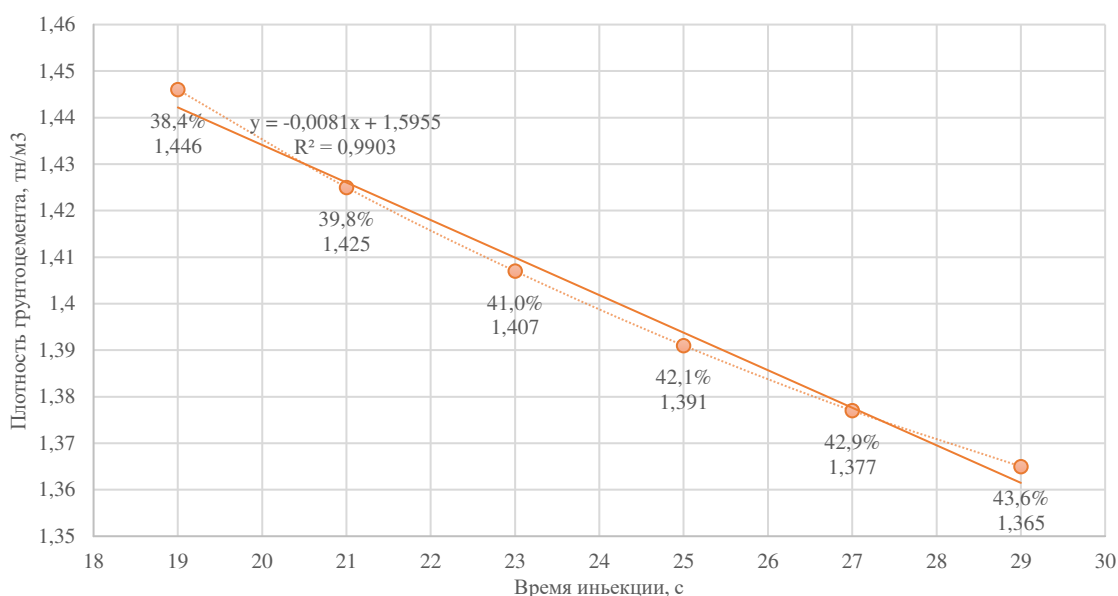


Рисунок 3.26 - Зависимость плотности грунтоцемента (кг) от времени подъема монитора (сек) за цикл - 4 см высоты колонны для грунта ИГЭ 3.1.

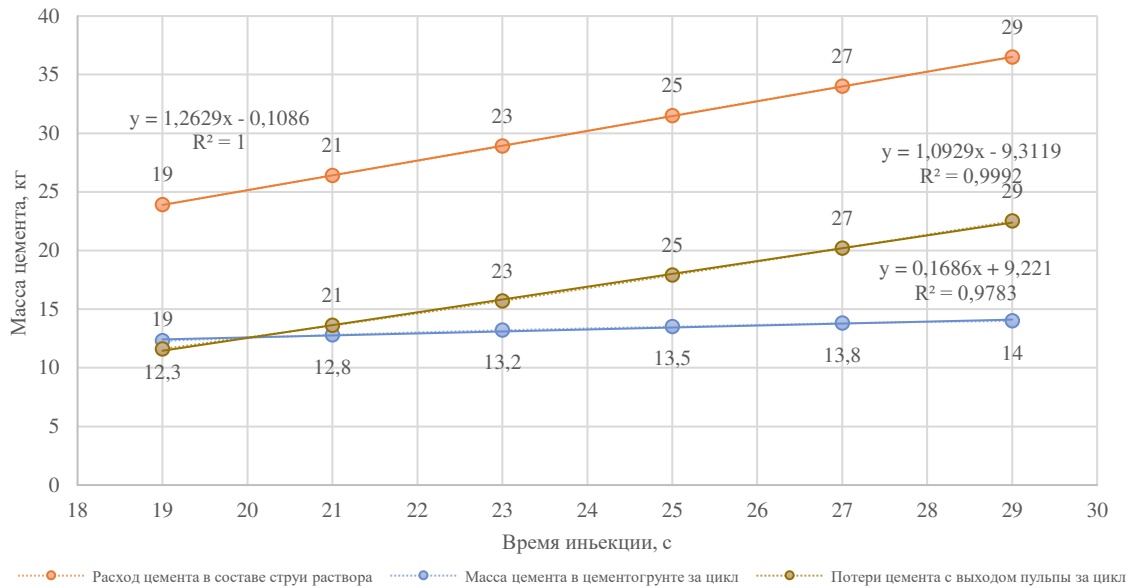


Рисунок 3.27 - Зависимости расхода цемента (кг) от времени подъема монитора (сек) за цикл - 4 см высоты колонны для грунта ИГЭ 3.1.

Зависимость, представленная на рисунке 3.26 и данные таблицы 7 Приложения В демонстрируют влияние времени инъектирования на показатели плотности получаемого грунтоцемента. Так же, как и с ИГЭ 2.1, увеличение времени обработки заданного отрезка колонны на 2 сек приводит к понижению плотности на 0,012-0,021 т/м³. Задержка на 10 сек приводит к понижению на 0,081 т/м³, с 1,446 т/м³ до 1,365 т/м³. Это связано с увеличением объёма воды, поступившей с раствором. Аналогично с объёмом поступившего цемента в колонне, он увеличивается с ~38% до ~44%.

На рисунке 3.26 также показана аналогичная динамика, как и у ИГЭ 2.1, что указывает на увеличение расхода цемента в составе струи практически в 2 раза (с 22 кг до 45 кг), увеличение массы цемента в грунтоцементе на ~15%, (с 12,3 кг до 14 кг), потерю цемента с выходом пульпы на 3-5 кг при задержке инъектирования на 2 сек, потерю цемента на 23 кг при задержке инъектирования на 10 сек.

Из данных таблицы 7 Приложения В и рисунков 3.25, 3.27 можно сделать вывод, что оптимальное время задержки монитора при инъектировании грунта составляет 23 сек, данное время обеспечивает требования в соответствии с



рисунком 3.27 по содержанию цемента в колонне (41%), плотности колонны ( $1,407 \text{ т/м}^3$ ).

Прогноз долговечности противofильтрационной завесы. Данные оценки долговечности грунтобетона, представленные в [159], показывают, что при колонне с диаметром 1 м, содержанием в нем цемента  $\sim 385\text{-}575 \text{ кг/м}^3$  (расчёт цемента на  $1 \text{ м}^3$ ) прогноз разрушения грунтобетона колонны в течение 50 лет составляет 13 мм ( $13/50=0,26 \text{ мм в год}$ ).

Экстраполируя эти данные с параметрами таблицы 6 Приложения В (диаметр колонны 0,8 метра, В/Ц = 0,7, масса цемента в  $1 \text{ м}^3$  колонны после закрепления 600 кг), таблицы 9 Приложение В (диаметр колонны 0,8 метра, В/Ц = 0,7, масса цемента в  $1 \text{ м}^3$  колонны после закрепления 650 кг) и данные поперечного разреза 1-1 (Приложение В) можно произвести расчёт прогноза разрушения грунтобетона (100% коррозии колонны) в дистиллированной воде:

- 0,8 метра вертикального барьера ( $0,8\text{м}/0,0013\text{м}$ )\*50лет  $\approx 30000$  лет;
- 1 метр горизонтального барьера ( $4,5\text{м}/0,0013\text{м}$ )\*50лет  $\approx 173000$  лет.

Показатели коррозии колонны в дистиллированной воде не могут считаться сроком службы инженерного барьера в условиях размещения модульного сооружения ППЗРО, т.к. грунтовые воды содержат соли сульфатов.

На основании данных [159], консервативная оценка разрушения грунтобетона, расположенного вертикально вдоль стены и горизонтально под основанием модульного сооружения, (обеспечивающего защиту стен, основания хранилища и глиняного замка от воздействия грунтовых вод), показывает, что коррозионная стойкость грунтобетона в 3-4 раза ниже коррозионной стойкости мелкозернистого бетона стен, марки бетона классов В15-В22,5.

Экстраполируя данные [159] и данные таблицы 2 Приложения Б, установлено, что образцы бетонов с составом компонентов ЦЕМІ42,5Н+КИВП обладают более низкими физическими характеристиками относительно других составов. Количество сульфатов, поглощённых растворённой частью бетона составляет (от массы цемента) у бетона класса В15 -1,64%, у бетона класса В20-1,31%, у бетона класса В22,5 -1,07%.

Срок до полного разрушения (из расчёта образцов размерами 100х100х100 мм<sup>3</sup> при условии воздействия на образец со всех сторон раствором солей сульфатов с концентрацией 500 мг/л) для бетона В15 составит 54 года, для бетона В20 составит 84 года и для бетона В22,5 составит 126 лет.

Принимая во внимание, что коррозионная стойкость грунтобетона в 3-4 раза ниже испытанных образцов, срок до полного разрушения образцов из грунтобетона составит  $126 \text{ лет} / 4 = 31,5 \text{ года}$ . Соответственно, консервативно, скорость разрушения грунтобетона можно принять  $50 \text{ мм} / 31,5 \text{ лет} = 1,6 \text{ мм/год}$ , при условии воздействия от периферии к центру образца (50мм).

Ширина вертикального барьера из грунтобетона с трубошпунтом составляет 80 см, толщина горизонтального барьера в донной части модульного сооружения - 450 см. Вертикальный барьер является стеной, работающей на сжатие и изгиб от давления грунта, направленного к стенке модульного сооружения, горизонтальный барьер является подушкой основания модульного сооружения и работает только на сжатие.

Эффективное функционирование данных барьеров принято при износе грунтоцемента до 60%, на основании того, что при большем износе возможно образование сквозных трещин и уменьшение функциональных характеристик барьеров. Также, принимая во внимание срок службы покрывающего экрана, составляющий 500 лет, возможность сульфатной коррозии в первые 500 лет наиболее вероятна со стороны вмещающей среды (т.е. с боков и снизу).

Далее принимается условие: начало процесса коррозии происходит с внешней стороны вертикального барьера из грунтобетона. Глубина коррозии за 500 лет составит  $d = 1,6 \text{ мм/год} * 500 \text{ лет} = 800 \text{ мм}$ . Таким образом, с учетом принятого эффективного функционирования барьеров при износе грунтоцемента до 60%, срок службы грунтобетонного вертикального барьера составит  $t = (800 \text{ мм} * 0,6) / 1,6 \text{ мм} + 100 \text{ лет}$  (срок службы трубного шпунта)  $\approx 400 \text{ лет}$ .

Срок службы горизонтального барьера складывается из двух этапов, коррозии только со стороны подстилающих пород, время которой составляет первые 400 лет (время разрушения вертикального барьера), и коррозии с двух

сторон по прошествии 400 лет, (сульфатные воды, преодолев вертикальный барьер заполнили отсек модульного сооружения и разрушают днище), процесс коррозии происходит сверху и снизу. Полный срок службы горизонтального барьера, с учетом сульфатной коррозии с двух сторон, составит  $t = 400 \text{ лет} + ((4500 \text{ мм} - 800 \text{ мм}) * 0,6) / (2 * 1,6 \text{ мм}) \text{ лет} \approx 1094 \text{ года}$ .

Морозостойкость грунтоцемента считается более низкой в сравнении с плотными бетонами из-за наличия в нем частиц грунта, глины, содержащих в своих порах воду. Однако, грунтоцементные колонны, возводимые вокруг и под объектами ППЗРО, в основном размещаются ниже уровня промерзания грунтов. Грунтоцементная плита, образуемая из набора колонн струйной цементации, находится ниже основания модульного сооружения, заглубленного в грунты на 6м, т.е. ниже глубины промерзания.

Грунтоцементная колонна, возводимая для трубошпунтовой завесы, представляет собой в верхней части превентор, предотвращающий выход шлама на поверхность. Диаметр превентора в 2 раза больше диаметра колонны, толщина до поверхности 3 м, основная, нижняя часть колонны так же находится вне зоны промерзания грунта.

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

1. В главе рассмотрены имеющиеся виды вертикальных противofильтрационных барьеров (барьеров безопасности): ограждения постоянного и временного типа. Проведён анализ и выбор противofильтрационной завесы, расчёты поступления воды через замки шпунта типа Ларсен, трубного шпунта, композиционного шпунта. Характерной особенностью композиционных шпунтов является большая разница в ресурсе эксплуатации: металлический шпунт типа Ларсен имеет срок активного стояния-11лет, трубный композиционный шпунт ~100 лет.

2. Противofильтрационные свойства подпорной трубошпунтовой завесы обеспечиваются использованием двутавровых замковых соединений (забирки), выполненных из композитного материала, размещаемых между соседними

трубошпунтами для коррекции направления при погружении трубошпунта, предотвращения проникновения грунтовых вод сквозь завесу.

3. Для исключения проникновения грунтовых вод к модульным сооружениям подпорная трубошпунтовая завеса предварительно усиливается, для этого по технологии струйной цементации перед установкой каждого трубошпунта создаются грунтоцементные колонны, в которые далее погружаются трубошпунты.

4. Согласно расчётов технологических параметров вертикальной противofильтрационной завесы из трубошпунта с анкерным креплением, у углепластиковой и стеклопластиковой труб с толщиной намотки 8 мм и 15 мм увеличение диаметра трубы с  $\varnothing 200$  мм до  $\varnothing 800$  мм приводит к увеличению массы, жесткости стенки трубы, момента инерции, изгибающего момента, снижению прогиба.

5. При анализе параметров углепластиковых и стеклопластиковых трубошпунтов выявлены два оптимальных размера, по физико-механическим характеристикам выдерживающих нагрузки при установке с дополнительным усилением трубошпунтовых барьеров самозабуриваемыми анкерами, это:

- углепластиковый трубный шпунт:  $\varnothing 500$  мм с толщиной стенки 8 мм ( $m=18,7$  кг/п·м,  $E=61000$  МПа,  $EJ \sim 22,8,4$  МПа·м<sup>2</sup>,  $H_{\max}=0,35$  м,  $M=0,66$  МН·м);
- стеклопластиковый трубный шпунт:  $\varnothing 500$  мм с толщиной стенки 8 мм ( $m=24,1$  кг/п·м,  $E=25000$  МПа,  $EJ=\sim 9,4$  МПа·м<sup>2</sup>,  $H_{\max}=0,87$  м,  $M=0,55$  МН·м).

6. Увеличение диаметра усиливающей штанги самозабуривающегося анкера с  $\varnothing 30$  мм до  $\varnothing 103$  мм приводит к изменению нагрузки, что влияет на прочность на растяжение, увеличивает массу штанги, жесткость стенки, изгибающий момент в момент сопротивления у стальной и стеклопластиковой штанг.

7. При анализе показателей стальных и стеклопластиковых штанг анкеров выявлены по три типоразмера штанг, обладающих высокими физико-механическими характеристиками, выдерживающих боковые нагрузки со стороны вмещающих пород, при усилении анкерами подпорной трубошпунтовой конструкции.

8. Применение облегченных стеклопластиковых трубошпунтов и анкеров со стеклопластиковыми штангами позволит возводить вертикальный барьер безопасности при более низкой массе элементов по сравнению со стальными трубошпунтами, с более длительным ресурсом эксплуатации.

9. Расчёт вертикальной противофильтрационной завесы произведён на оптимальных параметрах элементов:

- стеклопластиковая труба:  $\varnothing 500 \times 8$  мм ( $m=24,1$  кг/п.м,  $E=25000$  МПа,  $EJ \sim 9,4$  МПа·м<sup>2</sup>, прогиб трубы 0,87 м,  $M=0,55$  МН·м) производство АО «НИИГрафит» Госкорпорации Росатом;

- самозабуривающийся анкер со штангой из стеклопластика  $\varnothing 38 \times 8$  мм ( $P_T=490$  кН,  $A_s=0,0054$  м<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{раст}}=148$  МПа,  $m=1,5$  кг/п.м,  $E=25000$  МПа,  $EJ \sim 0,0023$  МПа·м<sup>2</sup>,  $M=0,0017$  МН·м).

10. Расчёты подтверждают работоспособность и ресурс принятых технических решений, на их основании выпущена и согласована рабочая документация: «Крепление стенок котлована «Очистные сооружения жилого комплекса «Авиаторов»», разработанная на предприятии ООО «Фундаментстрой» (см. Приложение Г).

11. Выполнен анализ имеющихся методов укрепления грунтов, технологий преобразования свойств грунта, в результате чего выявлено, что наиболее результативной технологией укрепления грунтов в районах потенциального строительства ППЗРО является струйная цементация, обеспечивающая высокую прочность и водонепроницаемость грунтов, включая глинистые, илистые грунты и пески.

12. Выполнен анализ последовательности технологических операций, сформулированы требования к устройству горизонтальной противофильтрационной завесы, процесс разделен на этапы.

13. Укрепленный грунт представляет собой стену в грунте, заглубленную не менее чем на 4 м, с однородными в плане и по глубине свойствами со следующими характеристиками: модуль деформации не менее 320 МПа; расчетное сопротивление по прочности на сжатие не менее 3,0 МПа.

14. Расчёты технологических параметров струйной цементации подтвердили, что ключевым параметром, определяющим конечную эффективность технологии, является количество цемента (в сухом состоянии), содержащегося в 1 м<sup>3</sup> укрепленного грунта. Для определения оптимальных технологических параметров производства грунтоцементных колонн произведен анализ факторов, влияющих на плотность получаемого грунтоцемента. Расчёты произведены с учётом разного водоцементного отношения (от 0,7 до 1,0), плотности портландцемента (3,1 т/м<sup>3</sup> и 1,6 т/м<sup>3</sup>), диаметров грунтоцементных колонн (0,8 м, 1,0 м). Выявлена зависимость плотности получаемого грунтоцемента от водоцементного отношения, а также влияние диаметра колонны на скорость подачи раствора из насоса высокого давления в буровой установке, что влияет на плотность в колонне и содержание цемента в грунтоцементной колонне по окончании заполнения заданного отрезка высоты укрепляемого массива.

15. Установлено, что увеличение диаметра колонны с 0,8 м до 1 м приводит к увеличению плотности грунтоцемента. Параллельно увеличению плотности происходит понижение содержания цемента в грунтоцементной завесе в среднем в полтора раза в обоих ИГЭ. Замена расчётных показателей плотности вяжущего (портландцемента) с  $\rho_{\text{цсм}} = 3,1 \text{ т/м}^3$  (истинная плотность) на  $\rho_{\text{цсм}} = 1,6 \text{ т/м}^3$  (насыпная плотность) приводит к симбатному понижению плотности колонны диаметром  $\varnothing 0,8 \text{ м}$  на 1,2-1,6%, колонны диаметром  $\varnothing 1,0 \text{ м}$  на 0,8-1,1% и увеличению содержания цемента в колонне в 1,5 раза в обоих типах грунтов ИГЭ 2.1 и ИГЭ 3.1.

16. Увеличение расхода раствора со 100 до 400 л/мин приводит к большей потере цемента с выходом пульпы. Увеличение расхода цемента в составе струи раствора (при 100 л/мин) увеличивает на 2-4% отношение массы цемента к весу грунтоцемента, и на 7-15% (при 400 л/мин) отношение массы цемента к весу грунтоцемента, что также повышает потери цемента с выходом пульпы от 0,2 кг (5%) до 0,7 кг (12%), это составляет от 3,9 до ~6 кг за цикл. Содержание цемента в грунтоцементе колонны увеличивается в среднем в 3,5-3,7 раза в зависимости от водоцементного отношения.

17. Установлено, что оптимальными технологическими параметрами

производства грунтоцементных колонн: в условиях грунта ИГЭ 2.1 является ТП5, в условиях грунта ИГЭ 3.1 является ТП21 (таблица 3, Приложение В).

Оптимальные показатели для устройства горизонтального барьера безопасности для грунтов ИГЭ 2.1, ИГЭ 3.1: расход цемента на 1м<sup>3</sup> грунтоцементной колонны – 1377 кг, или 688,5 кг на погонный метр колонны диаметром 0,8 м; водоцементное отношение – 0,7; расход инъекционного раствора на погонный метр – 0,5 м<sup>3</sup>; выход пульпы – 0,00091 м<sup>3</sup> = 0,09 литра; давление подачи инъекционного раствора 30 – 60 МПа; расход инъекционного раствора 100 л/мин; диаметр сопла 1,5 - 3,0 мм; скорость вращения 30 об/мин; время для заданного отрезка высоты 4 см – 22 сек. (скорость подъема монитора – 10 – 11 см/мин).

18. Условия размещения модульного сооружения отличаются содержанием солей сульфатов. Принято консервативно, что скорость разрушения грунтобетона можно принять  $50\text{мм}/31,5\text{лет} = 1,6 \text{ мм/год}$ ; допустимое функционирование данных барьеров принято при износе до 60%, при большем износе возможно образование сквозных трещин и уменьшение функциональных характеристик барьеров. Расчётным методом установлено, что срок службы барьеров безопасности составит: при толщине вертикального барьера, равного 0,8 м  $\approx 400$  лет. Полный срок службы горизонтального барьера, с учетом сульфатной коррозии с двух сторон, составит  $\approx 1094$  года.

19. Расчёты подтверждают работоспособность и ресурс принятых технических решений, на основании их выпущена и согласована:

- рабочая документация «Укрепление грунтов в основании трёх грузовых терминалов», №1/01-22, разработанной на ООО «СК «ИнжПроектСтрой», (см. Приложение Г);

- рабочая документация «Гидротехнические решения. Основной комплект рабочих чертежей» № 11587-16-1-ГР-Д 00198396-004-2019-ГР», разработанная АО «Гиредмет» в рамках работ «Реабилитация территории бывших урановых производств Киргизской республики. хвостохранилище «ТУЮК-СУУ», (см. Приложение Г).

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ППЗРО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТРУБОШПУНТОВОЙ И ГРУНТОЦЕМЕНТНОЙ ЗАВЕС

### 4.1. Модель геофильтрации (базовые дифференциальные уравнения) с критериями оптимальности и ограничениями

Дифференциальное уравнение фильтрационного потока пресной воды в пористой среде для случая напорной нестационарной фильтрации в декартовой системе координат имеет вид [160]:

$$\nabla(k\nabla H) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t) = \eta^* \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4.1)$$

$$H = \frac{P}{\rho_0 g} + z \quad (4.2)$$

$H$  – гидростатический напор ( $z$  в выражении 4.2 – высота точки над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения) (м);

$k$  – тензор коэффициента фильтрации;  $k_{x,y,z}$  – коэффициенты фильтрации в направлении координатных осей (м/сут);

$\eta^*$  – коэффициент упругой ёмкости фильтрационной среды (1/м);

$p$  – гидростатическое давление (Па);  $\rho_0 g$  – вес единицы объёма воды (Н/м³).

Для случая стационарной (квазистационарной) фильтрации уравнение 4.1 принимает вид [160]:

$$\nabla(k\nabla H) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z) = 0, \quad (4.3)$$

Расчёты проводятся с помощью программного кода COMSOL [161]. Расчет влагопереноса в элементах системы барьерной безопасности (СББ) ППЗРО производится с использованием фильтрационной модели для насыщенно-ненасыщенных условий на основе решения уравнения Ричардса [162]:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_w(h) \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz} \right) \right], \quad (4.4)$$

где:

$$k_w(h) = k S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2, m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1, \quad (4.5)$$



$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + |ah|^n]^m}, \quad (4.6)$$

$\theta$  – текущая объёмная влажность пород (-),

$\theta_r$  – максимальное объёмное содержание связанной воды (-),

$\theta_s$  – полная объёмная влажность пород (-),

$S_e$  – относительная влажность (-),

$t$  – время (сут),

$k_w$  – коэффициент влагопереноса (м/сут),

$k$  – коэффициент фильтрации при полном водонасыщении (м/сут),

$h$  – высота всасывания (отрицательная в зоне неполного влагонасыщения, положительная в зоне полного влагонасыщения, равная нулю на уровне грунтовых вод) (м),

$x_i$  ( $i=1,2$ ) – пространственные координаты (м),

$K_{ij}$  – единичная диагональная матрица,

$\alpha$ ,  $n$  – параметры Ван Генухтена:

$\alpha$  – параметр, обратный высоте капиллярного подъёма воды в породе (1/м),

$n$  – эмпирический параметр (-),

$l$  – параметр, характеризующий извилистость поровых каналов (-).

Двойной индекс  $ij$  означает суммирование по всем возможным сочетаниям индекса.

Далее принимается, что  $x_1$  – соответствует горизонтальной координате  $x$ , а  $x_2$  – вертикальной координате  $z$ . В этом случае  $K_{iz}$  – обозначает параметр, равный нулю при  $i=1$  и равный 1 при  $i=2$ .

Моделирование производится в профильной постановке с использованием расчетного кода COMSOL [161].

## **4.2. Моделирование геомиграционных потоков с используемыми целевыми функциями, критериями оптимальности и ограничениями.**

При моделировании геомиграции учитывались следующие механизмы переноса контаминантов и процессы [162]:

- адвекция (перенос с фильтрационным потоком);
- молекулярная диффузия и гидродисперсия;
- радиоактивный распад;
- сорбционные процессы обмена между жидкой и твёрдой фазами.

Уравнение массопереноса, описывающее нестационарное поле концентраций компонентов может быть представлено в виде [160]:

$$(n + K_d \rho_n) \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(vC) - \nabla(nD\nabla C) + \lambda(K_d \rho_n)C = Q_c(x, y, z, t), \quad (4.7)$$

$$v = -k\nabla H, \quad (4.8)$$

$$v_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x}, v_y = -k_y \frac{\partial H}{\partial y}, v_z = -k_z \frac{\partial H}{\partial z}, \text{ где} \quad (4.9)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}, \quad (4.10)$$

$n$  – активная пористость (-);

$K_d$  – коэффициент сорбционного распределения в системе «вода-вмещающая порода» ( $\text{м}^3$  воды/кг породы);

$\rho_n$  – плотность сухой породы ( $\text{кг}$  породы/ $\text{м}^3$  породы);

$C$  – объёмная концентрация (активность) растворенного вещества в жидкой фазе ( $\text{кг}/\text{м}^3$  воды или  $\text{Бк}/\text{м}^3$ );

$v$  – вектор скорости фильтрации ( $\text{м}/\text{сут}$ );

$D$  – тензор коэффициента суммарной дисперсии ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );

$\lambda$  – постоянная радиоактивного распада ( $1/\text{сут}$ );

$k$  – тензор коэффициента фильтрации ( $\text{м}/\text{сут}$ );

$v_x, v_y, v_z$  – составляющие вектора скорости фильтрации по координатным осям ( $\text{м}/\text{сут}$ );

$\nabla$  – дивергенция.

В коэффициент суммарной дисперсии входят две составляющие, описывающие процессы молекулярной диффузии и гидродисперсии. Согласно [160] в общем случае коэффициент суммарной дисперсии  $D$  представляет собой тензор второго ранга и для насыщенной пористой среды имеет вид:

$$nD_{ij} = D_{ij}^d + D_m \delta_{ij} = D_{ij}^d + \chi n D_m^0 \delta_{ij}, \quad (4.11)$$

$$D_{ij}^d + (\delta_L - \delta_T) \frac{v_i v_j}{|v|} + \delta_T |v| \delta_{ij}, \quad (4.12)$$

$D_{ij}^d$  – коэффициент, характеризующий гидродисперсию ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );

$D_m$  – эффективный коэффициент молекулярной диффузии ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );

$\chi$  – коэффициент извилистости путей фильтрации в пористой среде (-);

$D_m^0$  – коэффициент молекулярной диффузии в свободной среде, имеющий порядок  $10^{-4} \text{ м}^2/\text{сут}$  [163];

$\delta_L$  и  $\delta_T$  – продольная и поперечная дисперсивность, соответственно (м);

$|v|$  – модуль вектора скорости фильтрации ( $\text{м}/\text{сут}$ );

$v_i$  и  $v_j$  – проекции вектора скорости потока  $v$  на соответствующие координатные оси ( $\text{м}/\text{сут}$ );

$\delta_{ij}$  – дельта функция Кронекера (-), определяемая по формуле:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}; i, j = 1, 2, 3, \quad (4.13)$$

Для случая стационарного геомиграционного поля уравнение (4.7) принимает вид:

$$\nabla(vC) - \nabla(nD\nabla C) + \lambda(n + K_d \rho_n)C = Q_c(x, y, z). \quad (4.14)$$

Для моделирования геомиграции в настоящей работе используется программный комплекс COMSOL [161].

### 4.3. Валидация, анализ и оценка результатов моделирования

Для оценки пригодности предлагаемых технических решений необходимо подтвердить их работоспособность при условии внедрения в конструкцию ППЗРО. Для этого используется расчетная модель, выполненная в профильной постановке на основе характеристик модульного сооружения ППЗРО [121]. Расчетная модель соответствует сценарию нормальной эволюции ППЗРО (СНЭ). В модель введены дополнительные элементы: трубошпунт (вертикальный барьер) и противофильтрационная грунтоцементная завеса (горизонтальный барьер, возведённый методом струйной цементации) в соответствии с геометрией, представленной на рисунке 4.1.

Вертикальный барьер (трубошпунтовый) расположен под покрывающим экраном таким образом, что при движении осадков (количество осадков соответствует значению модуля фильтрационного питания  $0,04$  м/год), разгружающихся с покрывающего экрана в грунт, разгрузка происходила не между модульным сооружением и шпунтом, а перед шпунтом, и он выступал как защитный экран перед латеральным потоком грунтовых вод. Поэтому вертикальный барьер рассматривается как препятствие для латерального потока грунтовых вод.

Горизонтальный барьер толщиной  $4,5$  м (грунтоцементный) расположен под глиняным замком модульного сооружения толщиной  $1000$  мм, практически вплотную к вертикальному барьеру, для максимальной изоляции грунтовых вод от модульного сооружения ППЗРО.

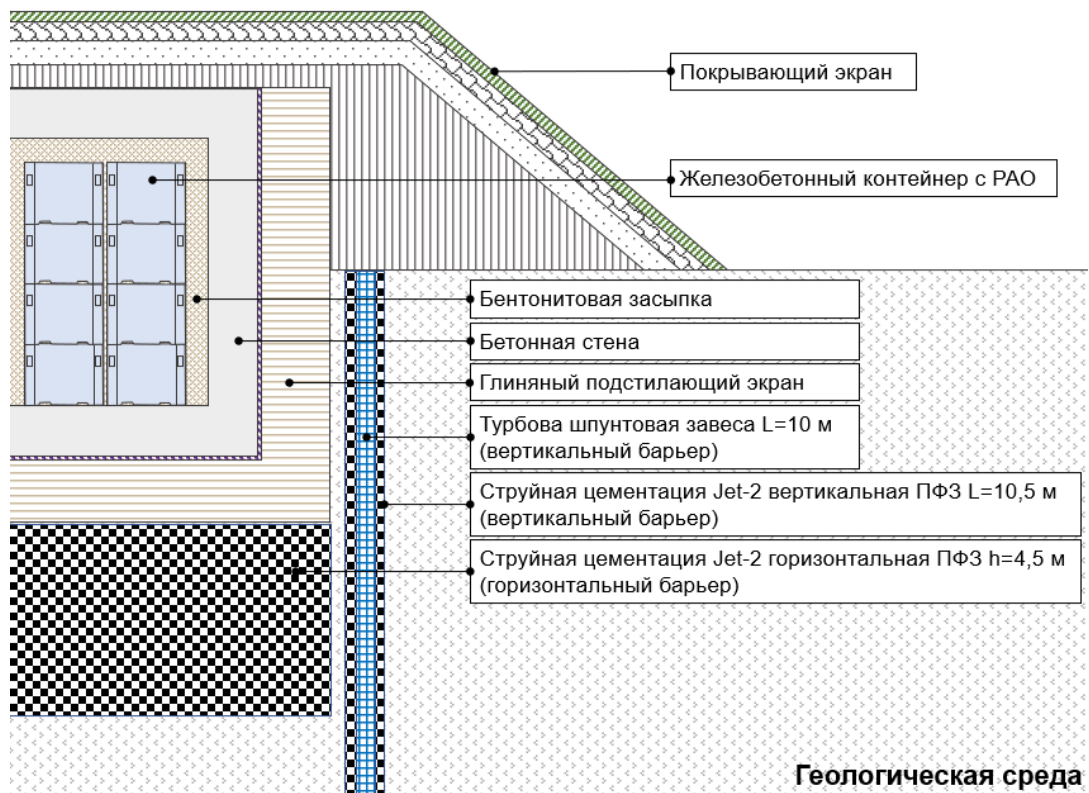


Рисунок 4.1 - Состав элементов ППЗРО.

Геометрия расчетной модели приведена на рисунке 4.2. Противофильтрационные свойства вертикального трубошпунта и горизонтального

барьера из грунтоцемента (стабилизированные грунты - органические грунты, глина, суглинок) определяются коэффициентом фильтрации:

- для шпунта:  $1 \cdot 10^{-5}$  м/сут [121];
- для грунтоцементной завесы:  $1 \cdot 10^{-4}$  м/сут [163].

Анализ влияния трубошпунтовой и грунтоцементной завес выполнен с использованием программных комплексов, разработанных С.В.Святовцом, А.А.Куваевым, Н.А.Анисимовым, (ФГБУ «Гидроспецгеология»), путем расчета фильтрации из ППЗРО малосорбируемого долгоживущего радионуклида йод-129. В качестве исходного принято условие, что бетонные конструкции модульного сооружения находятся в разрушенном состоянии и не являются препятствиями для атмосферных и грунтовых вод, а свойства трубошпунта и экрана струйной цементации остаются первоначальными, без изменений.

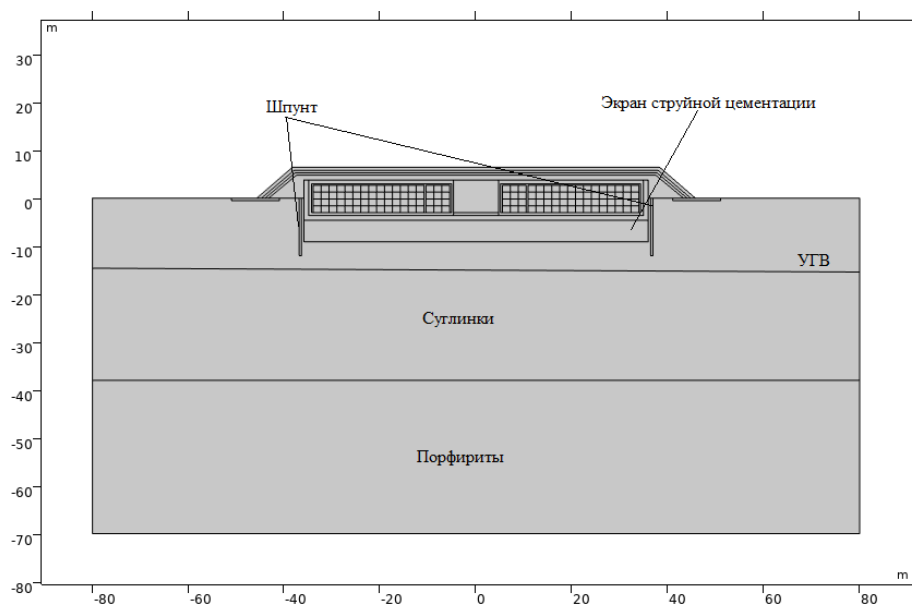


Рисунок 4.2 - Геометрия расчетной модели.

Расчеты выполнены для 4 вариантов сочетания условий:

- А – отсутствие трубошпунта и грунтоцементной завесы (рис. 4.3 а);
- Б – наличие трубошпунта и грунтоцементной завесы (рис. 4.3 б);
- В – наличие трубошпунта и отсутствие грунтоцементной завесы (рис. 4.3 в);
- Г – отсутствие трубошпунта и наличие грунтоцементной завесы (рис. 4.3 г).

На рисунке 4.3 приведены результаты расчета относительной влажности и векторов скоростей воды, фильтрующейся в конструкциях ППЗРО и в геологической среде на уровне грунтовых вод (УГВ). Видна неизменность векторов движения осадков и грунтовых вод, во всех четырёх вариантах сочетания условий, меняется только сочетание взаимодействий.

Так, на рисунке 4.3 а) показано взаимодействие глиняного замка модульного сооружения с атмосферными осадками и ламинарным потоком УГВ. На рисунке 4.3 б) показана комплексная работа горизонтального и вертикального барьеров, работающих как экран, по которому осадки и грунтовые воды огибают модульное сооружение ППЗРО, небольшой зазор между горизонтальным и вертикальными барьерами исключает возможность эффекта ванны и в случае разрушения верхнего покрывающего экрана не произойдёт сбора осадков и образования искусственного водоёма. На рисунках 4.3 в) и г) показана независимая работа горизонтального и вертикального барьеров.

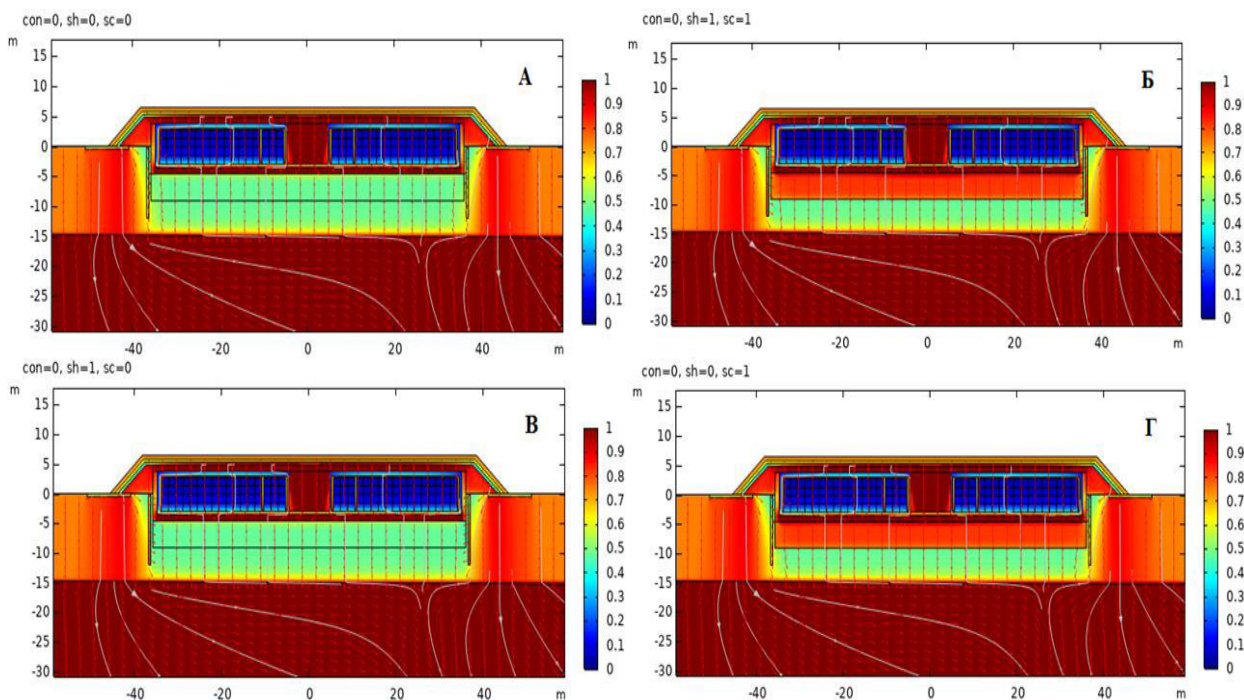


Рисунок 4.3 -Результаты расчётов относительной влажности и векторов скоростей воды с долгоживущими несорбируемыми РАО. Обозначения: sh – трубошпунт; sc – экран струйной цементации; 0 – отсутствие указанного элемента в конструкции ППЗРО; 1 – наличие указанного элемента в конструкции ППЗРО.

Рассматривается сценарий, когда модульное сооружение ППЗРО находится в подтопленном состоянии в результате поднятия уровня подземных вод (альтернативный сценарий АС2), уровень грунтовых вод УГВ=1,5м в промежутке времени 0 – 15 тысяч лет. По результатам расчетов миграции йода I-129 построены графики поступления радионуклида на уровень грунтовых вод (УГВ=1,5м) в промежутке времени от 0 до 15 тыс. лет, (рисунок 4.4).

Для выявления закономерностей фильтрации радионуклидов при движении с атмосферными и грунтовыми водами из модульного сооружения принимается: уровень грунтовых вод находится на глубине 1,5 м; в модели приведено соответствующее распределение относительной влажности. Нижние ряды упаковок полностью или частично находятся в подтопленном состоянии (Рис. 4.4).

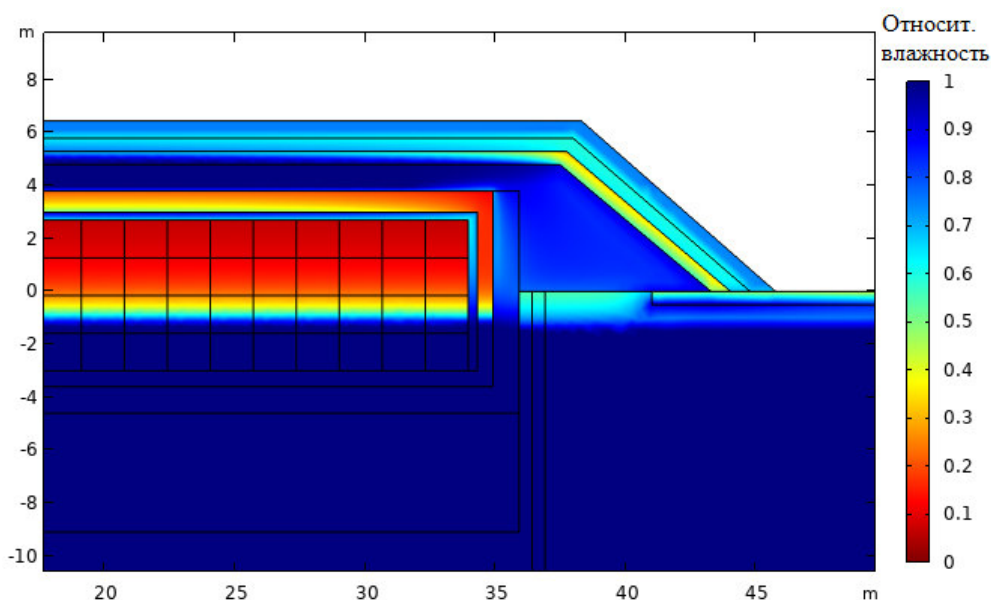


Рис.4.4. Распределение относительной влажности в модульном сооружении ППЗРО при глубине грунтовых вод 1,5м.

По результатам моделирования фильтрации радиоизотопа йод I-129 построены графики поступления радионуклида на уровень грунтовых вод (УГВ=1,5м) в период времени от 0 до 15 тыс. лет, (рисунок 4.5).

Приведенные на графиках результаты получены при условии сохранения целостности и свойств рассмотренных барьеров (шпунт, экран струйной цементации) на всем интервале моделирования, составившем 15 тысяч лет.

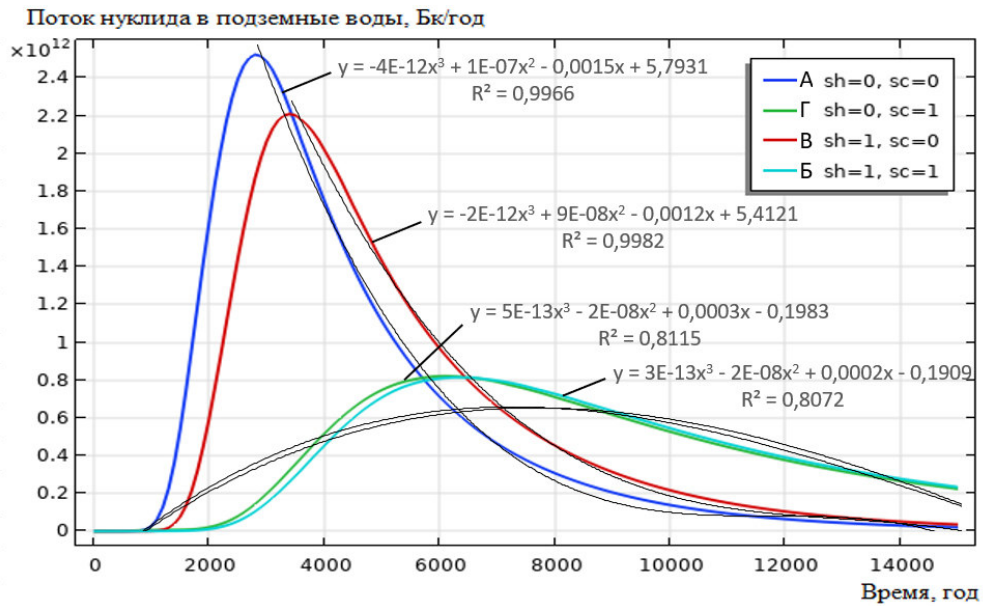


Рис. 4.5. Зависимости потока радионуклидов йода-129 в промежутке времени 0 – 15 тыс. лет для 4 вариантов работы барьеров безопасности - трубошпунтовой и грунтоцементной завес, УГВ=1,5м.

Из графиков рис.4.5 следует:

- при отсутствии трубошпунтовой завесы и экрана струйной цементации поток радионуклидов на уровень грунтовых вод достигает  $2,5 \times 10^{12}$  Бк/год в результате фильтрации нуклидов через природные суглинки;
- при отсутствии трубошпунтовой завесы и наличии экрана струйной цементации поток нуклидов снижается до  $0,8 \times 10^{12}$  Бк/год (в 3 раза), в основном благодаря эффекту сорбирования нуклидов экраном струйной цементации;
- при наличии трубошпунтовой завесы и отсутствии экрана струйной цементации (наличии природных суглинков) наблюдается сорбирование нуклидов, поток нуклидов на УГВ снижен до  $2,2 \times 10^{12}$  Бк/год; наблюдается некоторое сорбирование нуклидов трубошпунтовой завесой (14%);
- при наличии трубошпунтовой и грунтоцементной завес поток нуклидов на УГВ снижается до  $0,8 \times 10^{12}$  Бк/год (в 3 раза), график совпадает с графиком наличия экрана струйной цементации, эффект сорбирования нуклидов экраном струйной цементации является преобладающим.



На Рис. 4.6 приводится в подтверждение сопоставление поля скоростей фильтрации при вариантах без завес ( $sh=0$ ,  $sc=0$ ) и при наличии грунтоцементной завесы ( $sh=0$ ,  $sc=1$ ). Заметна значительная разница в величинах скоростей фильтрации в области расположения экрана струйной цементации: во втором случае они существенно меньше.

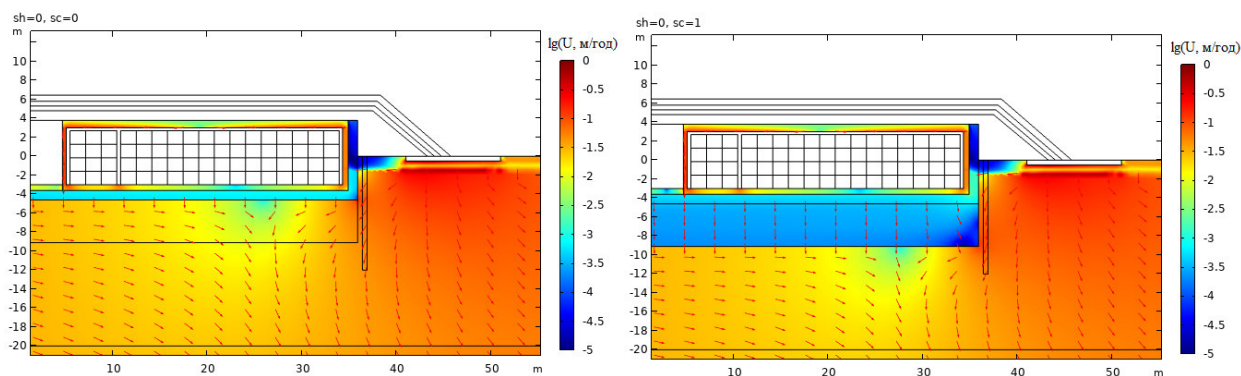


Рис. 4.6. Сопоставление поля скоростей фильтрации при вариантах ( $sh=0$ ,  $sc=0$ ) и ( $sh=0$ ,  $sc=1$ ).

Принятые в моделях коэффициенты фильтрации являются завышенными для рассматриваемых условий, т.к. не учтен эффект существенного замедления скорости движения подземных вод в грунтах, вызванного испарением воды с поверхности объектов ППЗРО и окружающей территории. Доля испаряемых вод достигает 40% от атмосферных осадков, что вносит существенное изменение в процесс миграции подземных вод в районе ППЗРО. Степень изоляции РАО в результате применения трубошпунта и экрана струйной цементации, с учетом фактора испарения воды в грунтах, будет выше.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. На основе рассмотрения процессов и факторов, свойственных системе инженерных барьеров безопасности при захоронении РАО, и с учетом нормативного перечня исходных событий, приведенного в НП-055-14 [47], выявлены сценарии, предназначенные для оценки долговременной безопасности.

2. Для выполнения расчетов по принятому сценарию разработаны концептуальные модели системы захоронения РАО, переноса радионуклидов с

подземными водами и формирования путей радиационного воздействия. Для осуществления прогнозных расчетов сделана параметризация геофильтрационной и геомиграционной моделей района размещения ППЗРО.

3. При возможном прогнозе поднятия уровня подземных вод на УГВ=1,5м, модульное сооружение ППЗРО находится в частично подтопленном состоянии, благодаря дополнительным барьерам безопасности – трубошпунтовой завесе и экрана струйной цементации поток нуклидов в подземных водах снижается в 3 раза.

4. Достижение максимума активности нуклидов на уровне УГВ происходит позже, со сдвигом «вправо» на 3 тысячи лет; выход нуклидов на УГВ более растянут во времени, радионуклиды имеют меньшую активность.

5. При отсутствии завес и при наличии трубошпунтовой завесы через 15 тыс. лет поток радионуклидов из хранилища 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 более растянут во времени, с меньшей активностью.

6. Расчёты подтверждают работоспособность и ресурс принятых технических решений, на их основании выпущены и согласованы:

- «Отчет по обоснованию безопасности на размещение и сооружение ППЗРО твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов (Челябинская область, Озерский городской округ), ФГУП «НО РАО» (см. Приложение Г);

- гидрогеологическая модель, прогнозные расчёты оценки долговременной безопасности ППЗРО 3, 4 классов, ФГУП «НО РАО», филиал Озёрский (см. Приложение Г).

## **ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

### **5.1. Методический подход к процедуре оценки**

Критериями и показателями безопасности служат не превышения установленных санитарными нормами воздействий на человека. В качестве критической выделяется группа лиц из населения, однородная по одному или нескольким признакам – полу, возрасту, социальным или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, исходя из потенциальных путей радиационного воздействия, связанного с ППЗРО.

Оценка долговременной безопасности выполнена на период потенциальной опасности РАО, под которым понимается начало снижения активности в контрольных точках расчета после достижения пиковых значений.

При проведении оценки долговременной безопасности предполагается период активного административного контроля – 100 лет, пассивного административного контроля – 300 лет.

Оценка долговременной безопасности ППЗРО выполнена на основе консервативно-реалистичного подхода. При недостаточности исходных данных применялся консервативный подход, который заключался в использовании допущений, параметров и исходных данных, заведомо приводящих к наиболее неблагоприятным результатам, то есть в предположении максимального потенциального воздействия ППЗРО на население и окружающую среду. При наличии обоснованных исходных данных и параметров (например, по данным изысканий) или их наиболее вероятных значений (на основе опыта эксплуатации аналогичных ППЗРО) применялись реалистичные значения.

Обоснование сценариев долговременной безопасности ППЗРО. В ходе разработки сценариев эволюции системы захоронения ППЗРО рассмотрены возможные события, явления и факторы природного и техногенного происхождения, и физико-химические процессы, существенно влияющие на

эволюцию ППЗРО, проанализированы причинно-следственные связи и установлены корреляции между этими событиями, явлениями, процессами и факторами, определены возможные пути поступления радионуклидов в окружающую среду и пути воздействия на человека.

На основе анализа перечня исходных событий, которые необходимо учитывать при оценке долговременной безопасности системы приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, в соответствии с приложением 3 НП-055-14 [47], в качестве событий, явлений, процессов природного и техногенного происхождения, существенно влияющих на безопасность ППЗРО рассмотрены факторы, представленные в таблице 27 названных выше НП.

Следствия, к которым могут привести воздействия, представленные в таблице 5.1, приведены в столбце «Примечания». На их основе разработаны следующие сценарии [47]:

- сценарий нормальной эволюции (СНЭ), описывающий наиболее вероятное сочетание воздействий и происходящих в системе захоронения процессов. СНЭ предполагает эволюционное протекание природных процессов и естественную деградацию инженерных барьеров безопасности, приводящую к постепенному снижению их прочностных и изолирующих свойств;

- альтернативные сценарии (АС), в которых учитываются факторы, не вошедшие в СНЭ, которые являются маловероятными относительно эволюционных процессов при СНЭ. В альтернативном сценарии 1 (АС1) предполагается преждевременная потеря изолирующих свойств системы инженерных барьеров безопасности (в том числе потенциальное образование трещин при сейсмическом воздействии). Альтернативный сценарий 2 (АС2) предполагает подтопление модульного сооружения (МС) ППЗРО в результате поднятия уровня подземных вод.

Группа воздействий, обусловленных деятельностью человека (3-я группа воздействий в таблице 5.1, задает сценарии формирования путей облучения людей [47].

Миграция радионуклидов из контейнеров с РАО, размещенных в модульных сооружениях (МС), происходит вследствие фильтрации влаги, поступающей в отсеки МС. При СНЭ, АС1, АС2 проникновение влаги обусловлено проникновением атмосферных осадков. Кроме этого, при АС2 появляется дополнительный путь проникновения влаги за счет поступления грунтовых вод. При СНЭ и АС2 задается постепенное (эволюционное) изменение свойств инженерных барьеров. В отличие от них при АС1 предполагается, что у барьеров безопасности происходит преждевременная потеря изолирующих свойств. Проникающая влага растворяет радиоактивные вещества и переносит их сквозь барьеры безопасности в подземные воды. Особенности сценариев и пути переноса влаги и растворенных веществ отражены на концептуальной модели, представленной на рисунке 5.1.

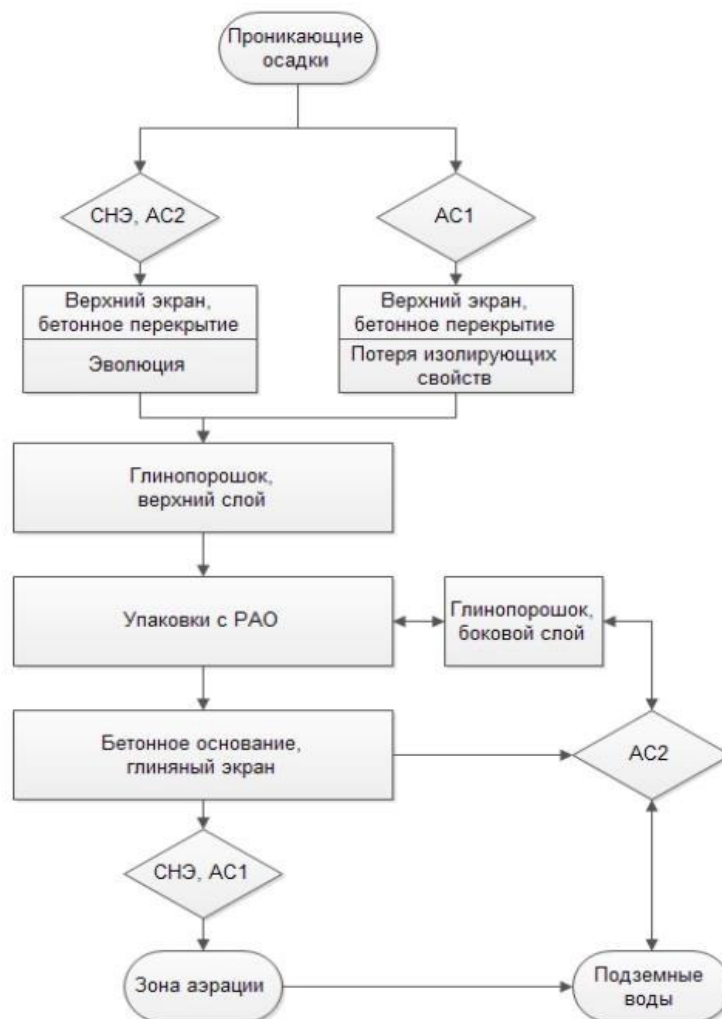


Рисунок 5.1 - Концептуальная модель сценариев и путей переноса влаги и растворенных веществ в отсеке модульного сооружения (основные ИББ) [47]

Блоками концептуальной модели с обозначением СНЭ, АС1, АС2 определяются пути и направления переноса влаги и РВ при соответствующих сценариях. При АС2 происходит проникновение подземных вод внутрь отсеков МС и отток влаги вместе с растворенными РВ из отсеков непосредственно в подземные воды. Это показано стрелками, имеющими два направления для данного сценария. При СНЭ, АС1, АС2 сценарий облучения людей подразумевает использование воды для бытовых нужд и сельскохозяйственной деятельности. Предполагается, что для орошения выращиваемых растений, хозяйственных целей, питья и приготовления пищи вода отбирается из скважины. При загрязнении воды радиоактивными веществами их перенос происходит по пищевой цепочке через растения и продукты животного происхождения. Также радиационное воздействие возможно из-за облучения от поверхности загрязненной почвы и от пыли, появляющейся в воздухе вследствие ветрового подъема. Дополнительные пути радиационного воздействия связаны с элементами открытой водной сети. В этой связи рассматривается использование воды из водоема для хозяйственных нужд и для водопоя домашних животных. Имеется путь внешнего облучения, возникающий при купании в водоеме. Концептуальная модель путей радиационного воздействия при СНЭ, АС1, АС2 представлена на рисунке 5.2 [47].

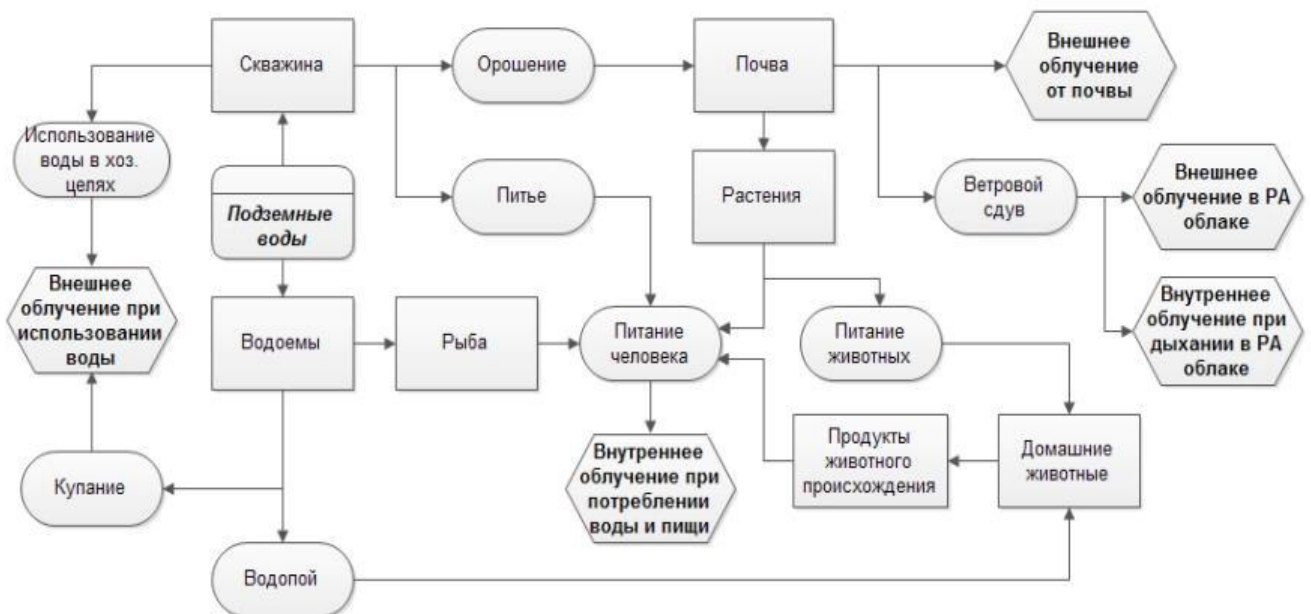


Рисунок 5.2 - Концептуальная модель путей радиационного воздействия при сценариях СНЭ, АС1, АС2 [47].

При СНВ1 предполагается, что выход радионуклидов происходит при проведении буровых работ и извлечении загрязненных горных пород. Учитываются следующие пути облучения рабочих (персонала), проводящих работы: - внешнее облучение от облака пыли, образовавшегося во время бурения; - внешнее облучение от извлеченных РАО; - внутреннее облучение ингаляционным путем. Также при расчете дозы на человека, проводящего буровые работы, учитывается внешнее облучение при его нахождении на поверхности ППЗРО с учетом покрывающего экрана.

При сценариях облучения СНВ1 – СНВ4 концептуальные модели облучения оказываются более простыми. Они показаны на рисунке 5.3. В качестве СНВ2 рассматривается строительство дороги, проходящей по территории ППЗРО, перекрытия. Будет происходить внешнее облучение от упаковок РАО, находящихся под перекрытием и слоем глины (глинопорошка).

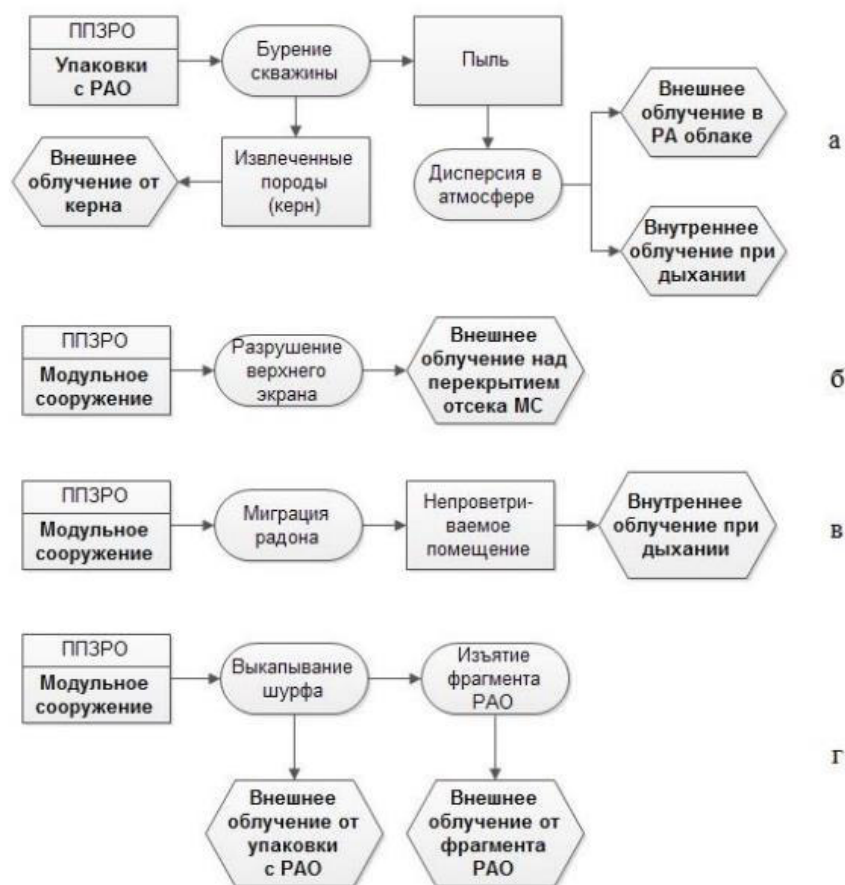


Рисунок 5.3 - Концептуальные модели при сценариях: а) СНВ1, б) СНВ2, в) СНВ3, г) СНВ4 [47].

Таблица 5.1. Перечень исходных событий и их учет при разработке сценариев для основных ИББ [47].

№	Воздействие		Сценарий	Примечание
1	2		3	4
1	Внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПЗРО	Сейсмические явления (включая землетрясение более 8 баллов)	АС1	Возможно образование трещин и ослабленных зон в элементах системы безопасности (инженерных барьерах). Воздействие точечное, кратковременное
		Подъем уровня подземных вод	АС2	Подтопление грунтовыми водами МС ППЗРО. Воздействие на все МС, возникающее после 400 лет после закрытия МС и длящееся далее на время прогноза.
2	Внутренние воздействия	Образование химических соединений, снижающих изолирующие свойства барьеров безопасности	СНЭ	В сценарии нормальной эволюции и альтернативных сценариях сорбция ИББ – глинопорошком засыпки – не учитывалась
			АС1	Преждевременная потеря сдерживающих свойств инженерными барьерами
		Газовыделение за счет процессов коррозии контейнеров и конструкционных материалов	-	Образование самовоспламеняющихся и воспламеняющихся газов, а также токсичных газов, аэрозолей и возгонов исключено в соответствии с принятыми критериями приемлемости
			СНЭ	Сценарий нормальной эволюции включает деградацию системы инженерных барьеров безопасности
		Деградация барьеров от радиационно-физических факторов	АС1	Преждевременная потеря сдерживающих свойств инженерными барьерами
		Микробиологическое разложение органических РАО	АС1	В соответствии с критериями приемлемости, в составе принимаемых на захоронение РАО не допускается содержание разлагающихся органических соединений. Рассмотрено уменьшение сроков сохранения изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности из-за образования химических соединений, способствующих ускоренной деградации материалов инженерных барьеров безопасности.
		Химическое разложение РАО	АС1	В соответствии с критериями приемлемости, принимаемые на захоронение РАО должны иметь химически стабильную форму, не допускающую химического разложения веществ, входящих в состав РАО. Рассмотрено уменьшение сроков сохранения изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности из-за образования химических соединений, способствующих ускоренной деградации инженерных барьеров безопасности.



Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5
		Механическое воздействие вышележащих (покрывающих хранилище РАО) горных пород	-	Конструкция приповерхностного ППЗРО не предусматривает механического воздействия вышележащих (покрывающих хранилище РАО) горных пород на размещаемые РАО. Воздействие многофункционального покрывающего экрана не окажет механического воздействия на размещенные РАО. Для исключения негативных последствий механического воздействия критериями приемлемости установлено требование по заполнению упаковки РАО или матричным материалом не менее чем на 80%.
		Физико-химическое (геохимическое) взаимодействие РАО со средами ближней зоны ПЗРО	СНЭ, АС1	Предусматривается выход радионуклидов из РАО в результате взаимодействия с атмосферными осадками и грунтовыми водами и их миграция через систему инженерных барьеров безопасности с учетом физико-химических взаимодействий. Образование химических соединений, способствующих ускоренной деградации материалов инженерных барьеров безопасности и, как следствие, уменьшение сроков сохранения изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности
3	Деятельность человека	Сельскохозяйственные работы	СНЭ, АС1, АС2, СНВ	Учитывается воздействие на критическую группу населения, занимающуюся натуральным хозяйством и использующую воду водоносного горизонта
		Использование грунтовых вод		
		Размещение населённых пунктов		
		Непреднамеренное использование радиоактивно загрязненных сред ППЗРО в качестве сырья для производства стройматериалов	СПВ	Рассматривается локальное непреднамеренное вторжение (бурение скважины) и глобальное вторжение (строительство дороги и жилого дома на территории ППЗРО)
		Археологические изыскания		
		Различные виды промышленной деятельности		
4	Проникновение животных и корней растений		АС1	Проникновение животных и корней растений может привести к преждевременному разрушению инженерных барьеров безопасности

Сценарий СНВ3 предполагает строительство жилого дома с фундаментом по верхней плите перекрытия ППЗРО [47]. Считается, что в доме имеется слабопрветриваемое помещение, в котором скапливается поступающий из МС радиоактивный газ (радон), представляющий опасность внутреннего облучения при дыхании. При СНВ4 рассматриваются археологические изыскания: осуществляется откапывание шурфа до слоя РАО, находящихся в верхнем ряду упаковок с РАО, и изъятие фрагмента отходов для последующего изучения. Радиоактивное воздействие связано с внешним облучением от РАО при откапывании шурфа и от фрагмента РАО при его переноске и последующем изучении.

Предполагается, что в ходе строительства дороги будет разрушено многофункциональное покрытие, но непосредственное вторжения в систему захоронения не произойдет: остаются конструкции стен и верхнего бетонного перекрытия.

## **5.2. Моделирование вариаций возможных сценариев проявлений аварийных ситуаций с оценкой кратко - и долгосрочных последствий**

Разрушение возводимых барьеров безопасности пунктов захоронения РАО происходит из-за проникновения поверхностных либо подземных вод к несущим и изолирующим железобетонным, металлическим конструкциям модульных сооружений и последующего воздействия путем химического взаимодействия с элементами матриц, узлов конструкций, с их преобразованием, вымыванием/разрушением связующих звеньев материала конструкций. Воздействие воды и растворенных в ней солей в течение геологически значимого периода времени (сотни и тысячи лет) превращает несущие бетонные конструкции стен, опор, днища и кровли в сыпучую среду, подобную песку кремниевых и других неразлагаемых соединений.

Принципами обеспечения безопасности при обращении с РАО на ППЗРО (согласующимися с требованиями НП-055-14 [47]) являются:

– обеспечение приемлемого уровня защищенности работников (персонала) и

населения от радиационного воздействия РАО в соответствии с принципами обоснования, нормирования и оптимизации (принцип защиты здоровья человека);

- обеспечение приемлемого уровня защищенности окружающей среды от вредного радиационного воздействия РАО (принцип охраны окружающей среды);
- прогнозируемые уровни облучения будущих поколений, обусловленные захоронением РАО, не должны превышать допустимых уровней облучения населения, установленных действующими нормативными документами (принцип защиты будущих поколений);
- невозложение на будущие поколения необоснованного бремени, связанного с необходимостью обеспечения безопасности при обращении с РАО (принцип невозложения чрезмерного бремени на будущие поколения);
- предотвращение аварий с радиационными последствиями и ослабление возможных последствий в случае их возникновения.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии определяют требования к наличию у пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) системы инженерных и естественных (геологических) барьеров безопасности [47].

Пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов структурно представлен в п. 1.2.1. (рис. 1.30, 2.1) состоит из системы инженерных барьеров, препятствующих распространению ионизирующего излучения, ядерных материалов и радиоактивных веществ в окружающую среду.

Как было приведено ранее, система инженерных барьеров ППЗРО включает основные барьеры безопасности:

**Первый барьер (ИББ1)** – контейнеры для захоронения РАО, срок службы железобетонных контейнеров, как инженерного барьера (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» [49]).

При использовании в экспериментах бетона на основе цемента ЦЕМІ52,5Н и добавки 2 срок разрушения образцов размерами 100х100х100мм<sup>3</sup> (от грани до центра образца 50мм) составил 1013 года (см. главу 2). Полагая возможные трещины, сколы и дефекты, двусторонний допустимый износ стенок контейнеров НЗК-150-1,5П с толщиной стенок 150мм сульфатами принимается 60%, время долгосрочной эксплуатации контейнеров, выполненных из полученного нового бетона, до начала проникновения грунтовых вод составит 1740 лет.

**Второй барьер** (ИББ2) – буферный сыпучий материал (назначение обеспечение снижения скорости миграции радионуклидов и ограничение доступа воды к контейнерам РАО или снижение времени контакта контейнеров РАО с водой). Время сохранения барьером изолирующей противофильтрационной функции устанавливается консервативно в течение не менее 300-500 лет.

**Третий барьер** (ИББ3) – бетонные сооружения стен, днища и перекрытий модульных сооружений (МС) ППЗРО. Бетонные сооружения составляют основу 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» [50] и ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» [51] и составляет минимум 100 лет.

При использовании бетона класса В50 (М700, ГОСТ 26633-2015 [75]), имеющего прочность на сжатие 70 МПа и плотность от 2,45 до 2,65 т/м<sup>3</sup>, марка бетона по водонепроницаемости и морозостойкости - не ниже W12 и F200, срок долговременной безопасности сооружений третьего барьера продлится потенциально до 300 лет [107]. При применении бетонных смесей класса В70 ( $\rho = 2,48$  т/м<sup>3</sup>,  $\sigma_{сж} = 91,1$  МПа), W20, F600,  $W_o = 0,79$  %, разработанных в п. 2.3, срок долговременной безопасности третьего барьера возможно составит от 300 до 1200 лет в геологических условиях размещения ППЗРО.

Следует рассмотреть конструктивные изменения, которые вызываются переходом от принятого в строительстве специальных объектов бетона класса В25

на бетон класса В70, полученный путем использования суперпластифицирующей добавки поликарбоксилата (п.2.4).

В проектировании и строительстве (ГОСТ 27751-2014), при возведении бетонных стен используется бетон класса В25 ( $\rho=2,33 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{сж}=33 \text{ МПа}$ , W6). Переход на бетон класса В70 ( $\rho=2,48 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{сж}=91,1 \text{ МПа}$ , W20, F600,  $W_o = 0,79 \%$ ), дает возможность уменьшить толщину несущих стен, днища и перекрытия модульного сооружения. Толщина стен уменьшается обратно пропорционально прочности используемого бетона на сжатие, с  $\sigma_{сж}=33 \text{ МПа}$  на бетон с  $\sigma_{сж}=91,1 \text{ МПа}$ , т.е. в 2,76 раза. По проекту, железобетонная стена имеет толщину 800мм. При переходе на бетон В70 толщина стен станет равной 300мм. Объем бетона, необходимого для возведения стен модульного сооружения сократится на  $570 \text{ м}^3$ . Водонепроницаемость стен, возрастая с W6 до W20, т.е. в 3,3 раза, останется прежней.

Учитывая малые величины толщины верхнего перекрытия, принимается, что она изменяться не будет при замене бетона.

Бетонное днище сооружается после укладки в траншею модульного сооружения глиняного подстилающего экрана и бентонитовых матов (толщиной 1000 мм) по дну модульного сооружения ППЗРО. Толщина бетонного днища модульного сооружения зависит от плотности и водонепроницаемости бетона. При использовании бетона класса В25, ( $\rho=2,33 \text{ т/м}^3$ , W6), в проекте строительства ППЗРО толщина днища принята 1000 мм ([50], ГОСТ 27751-2014).

Толщина днища при переходе на бетон класса В70, ( $\rho=2,48 \text{ т/м}^3$ , W20) может быть уменьшена, обратно пропорционально увеличению плотности, до 940 мм. Объем используемого бетона сократится на  $1786 \text{ м}^3$ , водонепроницаемость днища возрастет с W6 до W20, т.е. в 3,3 раза.

Общее уменьшение расхода бетона составит  $2356 \text{ м}^3$ . Уменьшение расхода бетона при строительстве модульных сооружений ППЗРО не является приоритетной целью. Данные специальные сооружения возводятся на срок эксплуатации, исчисляемый геологическими масштабами времени, сотни и тысячи лет. Первоочередной является задача обеспечения безопасности прилегающих

территорий и населения от воздействия ионизирующего излучения РАО. Применение высокопрочного бетона В70 – это продление срока безопасного состояния модульных сооружений ППЗРО.

**Четвертый барьер (ИББ4)** – 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. Консервативно срок сохранения противofильтрационной функции принимается не менее 300-500 лет.

**Пятый барьер (ИББ5)** – покрывающий многофункциональный гидроизолирующий экран, предназначенный для защиты модульных сооружений ППЗРО от атмосферных осадков, проникновения животных, корней растений и непреднамеренного вторжения человека.

Проектные сроки выполнения покрывающим гидроизолирующим экраном изолирующей функции в течение до 300-500 лет.

**Шестой барьер (дополнительный) (ИББ6)** – дренажная система. (Требуется специальная гидрогеологическая разработка, в диссертации не рассматривается).

**Седьмой барьер (дополнительный) (ИББ7)** может возводиться как при строительстве, эксплуатации ППЗРО, так и вокруг закрытого ППЗРО (предмет настоящей диссертационной работы). Это создание трубошпунтовой и грунтоцементной завес вокруг модульных сооружений ППЗРО. Предварительная трубошпунтовая завеса до полного разрушения сульфатами грунтовых вод стоит до 400 лет, грунтоцементная завеса – до 1100 лет.

### **5.3. Прогнозирование сроков долговременной безопасности ППЗРО с учетом различных сценариев обеспечения их эксплуатационной устойчивости**

В главах 2 - 4 получены результаты по созданию новых бетонов, отличающихся высокой прочностью, плотностью, водонепроницаемостью и сульфатостойкостью, а также разработаны дополнительные инженерные барьеры безопасности – трубошпунтовая и грунтоцементная завесы, которые увеличат срок

долговременной безопасности объектов ППЗРО. Однако, в соответствии с принятым консервативным подходом, дальнейший анализ состояния инженерных барьеров безопасности при их взаимодействии и взаимовлиянии проводится с использованием консервативных параметров, принятых в НП -055-14 [47] - исходных сроков «работы» основных барьеров безопасности.

Моделируется взаимодействие элементов системы инженерных барьеров безопасности (ИББ), для выявления опасных сочетаний событий, в различных комбинациях.

Первым принимается «упрощенный» сценарий: 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.

В соответствии с приложением 3 НП-055-14 [47], к основным относятся пять барьеров безопасности. Сначала рассматривается их взаимное воздействие при нарушении функционирования одного из них (рис. 5.4). Принимается, что вступление инженерных барьеров «в работу» (т.е. выход из строя) происходит только от внешних воздействий, в следующей последовательности (рис.5.4).

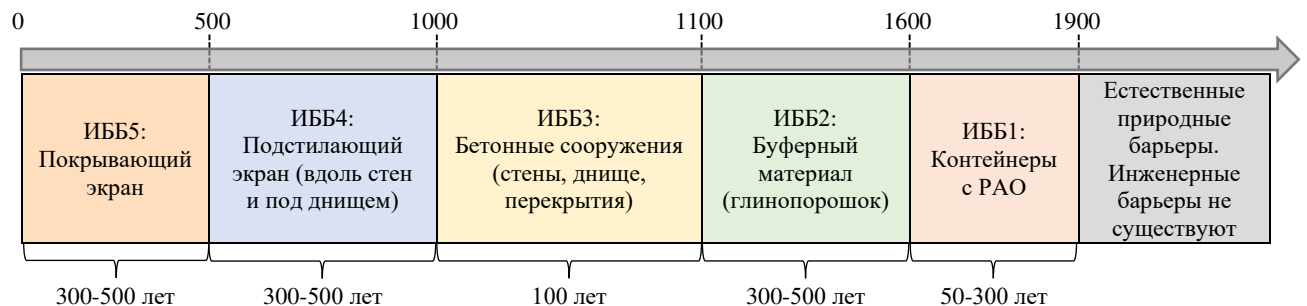


Рисунок 5.4 - Диаграмма последовательного «вступления в работу» основных инженерных барьеров безопасности во времени, (разрушение барьеров от воздействий поверхностных и грунтовых вод).

Моделируются сценарии последовательного выхода из строя одного или нескольких ИББ:

- сценарий нормальной эволюции (СНЭ) – эволюционное протекание природных процессов;

- альтернативный сценарий 1 (АС1) - преждевременная потеря изолирующих свойств системы инженерных барьеров безопасности (образование трещин);
- альтернативный сценарий 2 (АС2) - подтопление МС ППЗРО в результате поднятия уровня подземных вод, без учета влияния внутренних процессов в ИББ.

При внешнем воздействии (инфильтрация поверхностных, грунтовых вод) первыми «в работу» – (разрушается от воздействия внешних вод) вступает покрывающий экран (ИББ 5). После его 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 (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 фильтрационного проникновения или диффузии к ним воды от ИББ 2.

В диаграмме (рис.5.4) 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 внешних воздействиях) 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, ранее разрушение всего ППЗРО. Бетонные сооружения ИББ 3 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.



Число сочетаний совместной «работы» по 2, 3 или 4 барьера из всего набора ИББ определяется по формуле комбинаторики:

$$C = n!/m!(n-m)!,$$

где n- общее число элементов выборки, ИББ,

m- число элементов в выделяемой группе.

Выход из строя от внешнего воздействия одного ИББ. Рассматриваются последовательно сценарии выхода из строя от внешнего воздействия одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО (по диаграмме рис.5.4) и влияние этого события на состояние других ИББ (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Сценарии выхода из строя одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ

Влияние на Выход ИББ из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1
ИББ5	-----	Размывание глин, снижение изолирующих свойств	Ускоренная деградация, ранняя потеря прочности стен и потолочины	Размокание бентонита, потеря изолирующих свойств	-----
ИББ4	Разрушение изолирующих слоев, перекрытий	-----	Ускоренная деградация, ранняя потеря прочности стен и перекрытия	-----	-----
ИББ3	Нарушение целостности, потеря прочности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен, деформация барьера	-----	Ускоренная деградация, размокание бентонита	Раздавливание контейнеров покрывающим экраном, раннее разрушение
ИББ2	-----	-----	Ранняя потеря прочности стен, перекрытия	-----	Ускоренная деградация
ИББ1	-----	-----	-----	Влияние продуктов коррозии (н/р, ЖЗК)	-----

В комбинаторике – это число формальных сочетаний из 5 элементов по 2, всего 10; в таблицу 5.2 вносятся комментарии только реальных сочетаний, соответствующих диаграмме (рис.5.4), плюс ожидаемый результат.

Приводится только 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 5.2, при выходе из строя сразу после закрытия ППЗРО:

- покрывающего экрана (ИББ 5): приток инфильтрационных вод в защитный глиняный слой увеличится, бетонные сооружения стен, днища и потолочины 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.

Одновременный выход из строя 2-х ИББ. Далее последовательно рассматриваются сценарии одновременного выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, и какое влияние это оказывает на остальные ИББ (табл. 5.3).

Определение 1-й группы числа сочетаний из 5 двойных элементов по 3 (всего 10) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.4).

В соответствии с таблицей 5.3, при выходе из строя:

- ИББ 5 и ИББ 1: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала.

ИББ 4 и ИББ 2: ускоренная деградация стен и перекрытия, раннее разрушение бетона контейнеров, ИББ 3 – рассмотрено выше.

Определение 2-й группы числа сочетаний из 5 двойных элементов по 3 (всего 10) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.4, таблица 5.4). Таблица 5.4 строится путем перестановки правой колонки таблицы 5.3 вверх на один элемент.

Таблица 5.3. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (1-я группа). Всего таких таблиц должно быть 7.

Влияние на Выход из строя ИББ	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ5	----	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	Ускоренная деградация	----	ИББ1
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация	----	Раннее разрушение бетона	ИББ2
ИББ3	Потеря опоры, провал	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ3
ИББ2	----	Ускоренное насыщение водой	Ранняя потеря прочности	----	Ускоренная деградация	ИББ4
ИББ1	----	----	----	Влияние продуктов коррозии (н/р, ЖЗК)	Раннее разрушение контейнеров	ИББ5

Таблица 5.4. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (2-я группа).

Влияние на Выход из строя ИББ	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ5	----	Нарушение целостности, потеря изолирующих свойств	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ2
ИББ4	Потеря опоры, проседание	----	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ3
ИББ3	Потеря опоры, проседание	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ4
ИББ2	----	Ускоренное насыщение водой, потеря изолирующих свойств	Ранняя потеря прочности	----	Ускоренная деградация	ИББ5
ИББ1	----	----	----	Влияние продуктов коррозии (н/р, ЖЗК)	Раннее разрушение контейнеров	ИББ1

В соответствии с таблицей 5.4, при выходе из строя:

– ИББ 5 и ИББ 2: нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений, раннее начало разрушения бетона контейнеров.

– ИББ 4 и ИББ 3: потеря опоры, проседание покрывающего экрана, потеря изолирующих свойств бентонитовой засыпкой.

Определение 3-й группы числа сочетаний из 5 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.4, табл. 5.5). Таблица 5.5 строится путем перестановки правой колонки таблицы 5.3 вверх на один элемент.

Таблица 5.5. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (3-я группа).

Влияние на Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ5	----	Нарушение целостности, потеря изолирующих свойств	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ3
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	----	----	ИББ4
ИББ3	Потеря опоры, проседание	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ5
ИББ2	----	----	Ранняя потеря прочности	----	Ускоренная деградация	ИББ1
ИББ1	----	----	Ранняя потеря прочности	Потеря изолирующих свойств	Раннее разрушение контейнеров	ИББ2

В соответствии с таблицей 5.5, при выходе из строя:

- ИББ 5 и ИББ 3: нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;
- ИББ 2 и ИББ 1: ранняя потеря прочности стен и перекрытия кровли.

Определение 4-й группы числа сочетаний из 5 двойных элементов по 3 и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.4, табл. 5.6). Таблица 5.6 строится путем перестановки правой колонки таблицы 5.4 вверх на один элемент.

В соответствии с таблицей 5.6, при выходе из строя:

- ИББ 5 и ИББ 4: нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;

– ИББ 3 и ИББ 1: проседание покрывающего экрана при потере опоры, нарушение изолирующих свойств, целостности глиняной оболочки, бентонитовой засыпки.

Таблица 5.6. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (3-я группа).

Влияние на Выход ИББ из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ5	----	Нарушение целостности, потеря изолирующих свойств	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ4
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация, потеря прочности, разрушение	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ5
ИББ3	Потеря опоры, проседание	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее начало разрушения бетона контейнеров	ИББ1
ИББ2	----	----	Ранняя потеря прочности	----	Ускоренная деградация	ИББ2
ИББ1	Потеря опоры, проседание	----	Ранняя потеря прочности	Потеря изолирующих свойств	Раннее разрушение контейнеров	ИББ3

Сценарии взаимодействия всех (7) структурных элементов системы инженерных барьеров безопасности. Рассматривается система взаимодействия инженерных барьеров, с учетом дополнительных ИББ 6 и ИББ 7.

Вступление инженерных барьеров «в работу» происходит только от внешних воздействий, в следующей последовательности (рис.5.5).

Рассматривается сценарий последовательного выхода из строя одного или нескольких ИББ (сценарий нормальной эволюции (СНЭ) – эволюционное протекание природных процессов; альтернативный сценарий 1 (АС1) - преждевременная потеря изолирующих свойств системы инженерных барьеров безопасности; альтернативный сценарий 2 (АС2) - подтопление МС ППЗРО в результате поднятия уровня подземных вод), без учета влияния внутренних процессов в ИББ. При внешнем воздействии (инфильтрация поверхностных, грунтовых вод) первыми «в работу» вступают: покрывающий экран (ИББ 5), дренажные сооружения (ИББ 6), трубошпунтовая и грунтоцементная завесы (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 (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.

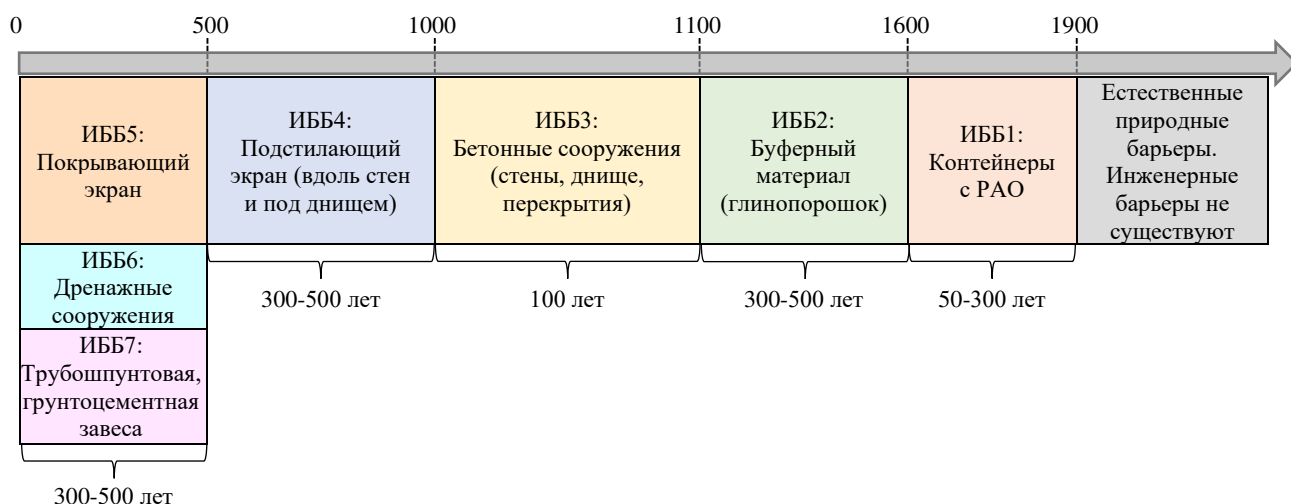


Рисунок 5.5 - Диаграмма последовательного «вступления в работу» всех инженерных барьеров безопасности во времени, (разрушение барьеров от воздействий поверхностных и грунтовых вод).

В диаграмме (рис.5.5) 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 внешних воздействиях) 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, ранее разрушение

всего ППЗРО. Бетонные сооружения ИББ 3 выйдут из строя раньше (через 100 лет), чем защищающий их от грунтовых вод подстилающий экран ИББ 4 (через 300-500 лет). Комбинаций может быть большое количество. Ниже рассмотрены сценарии – все сочетания совместной «работы» различных ИББ и выделение из них реальных.

Выход из строя от внешнего воздействия одного ИББ из 7. Рассматриваются последовательно сценарии выхода из строя от внешнего воздействия одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО (по диаграмме рис.5.6) и влияние этого события на состояние других ИББ (табл. 5.7).

В комбинаторике – это число формальных сочетаний из 7 элементов по 2, всего 21; в таблицу 5.7 вносятся комментарии только реальных сочетаний (12), соответствующих диаграмме (рис.5.5), + ожидаемый результат.

Таблица 5.7. 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 заилнения	----	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 внешнее влияние на данном этапе, 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 5.7, при выходе из строя сразу после закрытия ППЗРО:

- трубошпунта и грунтоцементной 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 грунтоцементную 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.

Одновременный выход из строя 2-х ИББ из 7. Далее последовательно рассматриваются сценарии одновременного выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, и какое влияние это событие оказывает на остальные ИББ (таблица 5.8).

Определение 1-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.6).

В соответствии с таблицей 5.8, при выходе из строя:

- ИББ 7 и ИББ 1: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что может вызвать раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;



– ИББ 6 и ИББ 2: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО.

– ИББ 5 и ИББ 3: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала.

Таблица 5.8. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (1-я группа).

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

Определение 2-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.5, таблица 5.9). Таблица 5.9 строится путем перестановки правой колонки таблицы 2 вверх на один элемент.

В соответствии с таблицей 5.9, при выходе из строя:

– ИББ 7 и ИББ 2: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;

- ИББ 6 и ИББ 3: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;
- ИББ 5 и ИББ 4: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений.

Таблица 5.9. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (2-я группа).

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

Определение 3-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.5, таблица 5.10). Таблица 5.10 строится путем перестановки правой колонки таблицы 5.9 вверх на один элемент. (d таблице 5.10 и далее число колонок ограничено 5-ю основными барьерами безопасности, в силу отсутствия влияния на ИББ6 и ИББ7).

В соответствии с таблицей 5.10, при выходе из строя:

- ИББ 7 и ИББ 3: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;

– ИББ 6 и ИББ 4: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;

– ИББ 6 и ИББ 4: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений.

И так далее по 3-ей группе.

Таблица 5.10. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (3-я группа).

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ7	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	----	----	----	ИББ3
ИББ6	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	----	----	ИББ4
ИББ5	----	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ5
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация	----	----	ИББ6
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	----	Ускоренное насыщение водой	----	ИББ7
ИББ2	----	----	Ускоренная деградация	----	----	ИББ1
ИББ1	----	----	Ускоренная деградация	----	----	ИББ2

Определение 4-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой рис.5.5, таблица 5.11). Таблица 5.11 строится путем перестановки правой колонки таблицы 5.10 вверх на один элемент.

В соответствии с таблицей 5.11, при выходе из строя:

– ИББ 7 и ИББ 4: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;

– ИББ 6 и ИББ 5: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;

– ИББ 7 и ИББ 4: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений.

И так далее по 4-й группе.

Аналогично таблицам 5.10 и 5.11 строятся следующие 2 таблицы с перестановкой событий в правой колонке вверх на один элемент. Общее число групп сочетаний из 7 двойных элементов по 3 равно 7, из них соответствующих диаграмме рис.5.5 – 21 сочетание.

Таблица 5.11. Сценарии выхода из строя 2-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других ИББ (3-я группа).

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя
ИББ7	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	----	----	ИББ4
ИББ6	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Потеря изолирующих свойств	----	ИББ5
ИББ5	----	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ6
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация	----	----	ИББ7
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	----	Ускоренное насыщение водой	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ1
ИББ2	----	----	Ускоренная деградация	----	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ2
ИББ1	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ3

Одновременный выход из строя 3-х ИББ из 7. Следующий этап – анализ числа групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4 (Таблица 5.12, 1-я группа). Таблица 5.12 образуется следующим образом: в таблице 5.8 добавляется вторая

правая колонка со сдвигом на одно событие вверх (например, ИББ7, ИББ 1 и ИББ 2).

Таблица 5.12. Сценарии выхода из строя 3-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, влияние этого события на состояние других ИББ (1-я группа)

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя	
ИББ7	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	----	----	ИББ1	ИББ2
ИББ6	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Потеря изолирующих свойств	----	ИББ2	ИББ3
ИББ5	----	----	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ3	ИББ4
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация	----	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ4	ИББ5
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	----	Ускоренное насыщение водой	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ5	ИББ6
ИББ2	----	----	Ускоренная деградация	----	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ6	ИББ7
ИББ1	----	----	----	Ускоренная деградация	----	ИББ7	ИББ1

В соответствии с таблицей 5.12, при выходе из строя:

- ИББ 7, ИББ 1 и ИББ 2: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;
- ИББ 6, ИББ 2 и ИББ 3: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;
- ИББ 5, ИББ 3 и ИББ 4: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;

- ИББ 3, ИББ 5 и ИББ 6: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала;
- ИББ 2, ИББ 6 и ИББ 7: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО.

Следующий шаг – анализ числа групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4 (Таблица 5.13, 2-я группа)). Таблица 5.13 образуется следующим образом: в таблице 5.12 сдвигается вторая правая колонка на одно событие вверх (например, ИББ7, ИББ 1 и ИББ 3).

Таблица 5.13. Сценарии выхода из строя 3-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, влияние этого события на состояние других ИББ (2-я группа)

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя	
ИББ7	Нарушение целостности, просадки	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Снижение изолирующих свойств	-----	ИББ1	ИББ3
ИББ6	-----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Потеря изолирующих свойств	Раннее разрушение контейнеров	ИББ2	ИББ4
ИББ5	-----	-----	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ3	ИББ5
ИББ4	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	-----	ИББ4	ИББ6
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	-----	Ускоренное насыщение водой	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ5	ИББ7
ИББ2	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ6	ИББ1
ИББ1	-----	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	ИББ7	ИББ2

В соответствии с таблицей 5.13, при выходе из строя:

- ИББ 7, ИББ 1 и ИББ 3: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне

верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;

– ИББ 6, ИББ 2 и ИББ 4: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;

– ИББ 5, ИББ 3 и ИББ 7: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;

– ИББ 2, ИББ 1 и ИББ 6: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала;

– ИББ 2, ИББ 1 и ИББ 7: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО.

Следующий шаг – анализ числа групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4 (таблица 5.14, 3-я группа)). Таблица 5.14 образуется следующим образом: в таблице 5.13 сдвигается вторая правая колонка на одно событие вверх (например, ИББ7, ИББ 1 и ИББ 4).

В соответствии с таблицей 5.14, при выходе из строя:

– ИББ 7, ИББ 1 и ИББ 4: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;

– ИББ 6, ИББ 2 и ИББ 5: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, теряет опору покрывающий экран, нарушается целостность вдоль стен;

– ИББ 5, ИББ 3 и ИББ 6: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;

– ИББ 3, ИББ 5 и ИББ 1: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала;

– ИББ 1, ИББ 3 и ИББ 7: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО. И так далее рассматривать переборы вариантов.

Таблица 5.14. Сценарии выхода из строя 3-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, влияние этого события на состояние других ИББ (3-я группа).

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя	
ИББ7	Нарушение целостности, просадки	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Снижение изолирующих свойств	-----	ИББ1	ИББ4
ИББ6	-----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Потеря изолирующих свойств	Раннее разрушение контейнеров	ИББ2	ИББ5
ИББ5	-----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ3	ИББ6
ИББ4	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	-----	ИББ4	ИББ7
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	-----	Ускоренное насыщение водой	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ5	ИББ1
ИББ2	-----	-----	Ускоренная деградация	-----	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ6	ИББ2
ИББ1	Нарушение целостности, просадки	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	-----	Ускоренная деградация	-----	ИББ7	ИББ3

Далее – анализ числа групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4 (Таблица 5.15, 4-я группа). Таблица 5.15 образуется следующим образом: в таблице 5.14 сдвигается вторая правая колонка на одно событие вверх (например, ИББ7, ИББ 1 и ИББ 5).

В соответствии с таблицей 5.15, при выходе из строя:

- ИББ 7, ИББ 1 и ИББ 5: увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне верховодки и инфильтрации поверхностных вод, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;
- ИББ 5, ИББ 3 и ИББ 4: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение



целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений;

– ИББ 3, ИББ 5 и ИББ 7: уменьшение воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала;

– ИББ 2, ИББ 3 и ИББ 5: увеличится инфильтрация вод в грунтоцементную завесу и подстилающий глиняный экран, ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО. И так далее вниз по таблице 5.15.

Таблица 5.15. Сценарии выхода из строя 3-х ИББ сразу после закрытия ППЗРО, влияние этого события на состояние других ИББ (4-я группа)

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ5	ИББ4	ИББ3	ИББ2	ИББ1	Выход из строя	
ИББ7	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Снижение изолирующих свойств	----	ИББ1	ИББ5
ИББ6	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ранняя потеря прочности стен	Потеря изолирующих свойств	Раннее разрушение контейнеров	ИББ2	ИББ6
ИББ5	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ3	ИББ7
ИББ4	----	----	Ускоренная деградация	----	----	ИББ4	ИББ1
ИББ3	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренное насыщение водой	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ5	ИББ2
ИББ2	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Снижение изолирующих свойств	Раннее разрушение бетона контейнеров	ИББ6	ИББ3
ИББ1	----	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	----	ИББ7	ИББ4

Далее определяются результаты сочетаний ИББ подобно предыдущим, в каждом сочетании событий. Аналогично таблице 5.10, строятся следующие таблицы с перестановкой событий в последней колонке, далее - в предпоследней колонке. Общее число групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4 равно 35, из них соответствующих диаграмме рис.5.5 – 21 элемент.

Сценарий при наличии внутренних процессов разрушения в контейнерах РАО. Рассматривается сценарий при наличии внутренних процессов разрушения в контейнерах РАО (ИББ 1), вызванных присутствием влаги, биологических веществ и бактерий (рис. 5.6). Рассмотрен сценарий для основного состава барьеров безопасности, состоящий из 5 ИББ.

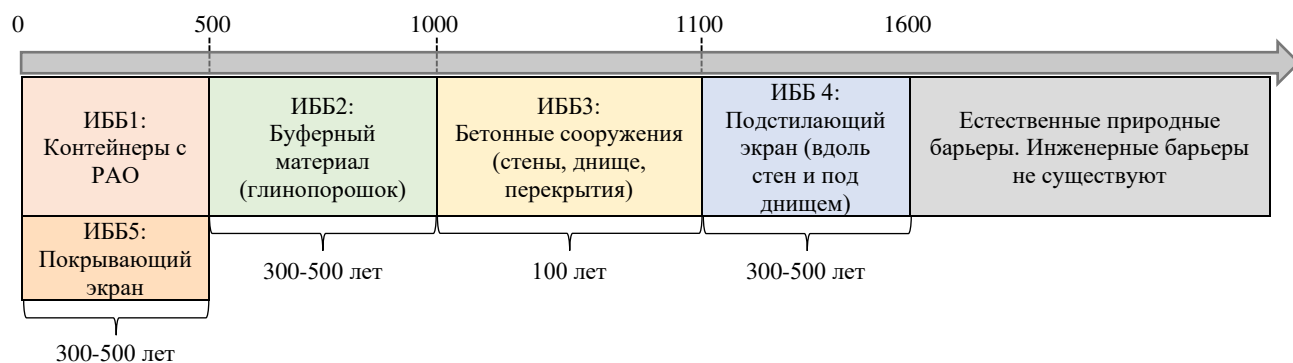


Рисунок 5.6 - Сценарий с учетом внутренних процессов разрушения, вызванных наличием влаги, биологических веществ и бактерий в контейнерах РАО (ИББ1) в системе основных (5) барьеров безопасности.

Разрушение от внешних факторов барьеров ИББ 5 и ИББ 3 начнется через 400-600 лет. Встречные процессы разрушения изнутри и внешние состыкуются. В принятой схеме последовательности выхода из строя барьеров безопасности разрушение внутри контейнеров ИББ 1 и буферного материала ИББ 2 создают условия для раннего доступа внешнего разрушения к радионуклидам и начала их выноса за пределы ППЗРО на 300-500 лет (рис. 5.6). Подобное взаимодействие ИББ 1 имеет с подстилающим экраном ИББ 4.

Сценарий, состоящий из 7 барьеров безопасности (плюс два дополнительных барьера безопасности), с учетом внутренних процессов разрушения, вызванных наличием влаги, биологических веществ и бактерий в контейнерах РАО (ИББ1) приведен на рис. 5.8. Ранний выход из строя ИББ 1 (50 лет) является внутренним процессом и влияет на последовательность процессов разрушения изнутри ИББ 2. Буферный материал ИББ 2 (глиняная – СБМК или бентонитовая засыпка) разрушается через 300-500 лет. Разрушение от внешних факторов барьеров ИББ 5 и ИББ 3 начнется через 400-600 лет. Встречные процессы разрушения изнутри и

внешние стыкуются. В принятой схеме последовательности выхода из строя барьеров безопасности разрушение внутри контейнеров ИББ 1 и буферного материала ИББ 2 создают условия для раннего доступа внешнего разрушения к радионуклидам и начала их выноса за пределы ППЗРО на 300-500 лет (рис. 5.7).

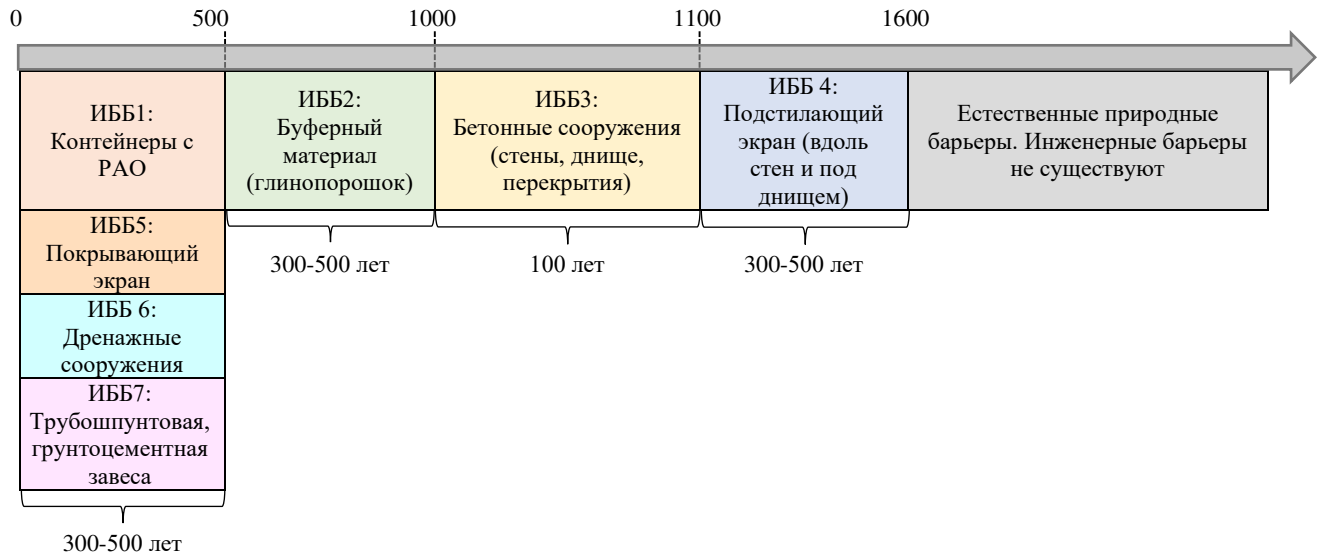


Рисунок 5.7 - Сценарий с учетом внутренних процессов разрушения, вызванных наличием влаги, биологических веществ и бактерий в контейнерах РАО (ИББ1) при 7 барьерах безопасности.

Аналогично рассматриваются сценарии с ранним выходом из строя других ИББ из-за воздействий: влияния поровых вод и др. Они так же должны рассматриваться во временной последовательности, влияния поверхностных и грунтовых вод, в получаемых комбинациях ИББ.

Консервативный сценарий (при 7 барьерах безопасности). Инженерные барьеры ИББ 3, состоящие из бетона, металлических конструкций, эффективно противостоят разрушению 100 лет, далее начинают разрушаться. Стены МС, перекрытия являлись опорой для ИББ 5 – покрывающего экрана, который начнет разрушаться ранее проектного срока, потеряв опору.

«В работу» вступают все ИББ сразу после заполнения модульного сооружения контейнерами с РАО (закрытия ППЗРО) (рис. 5.8).

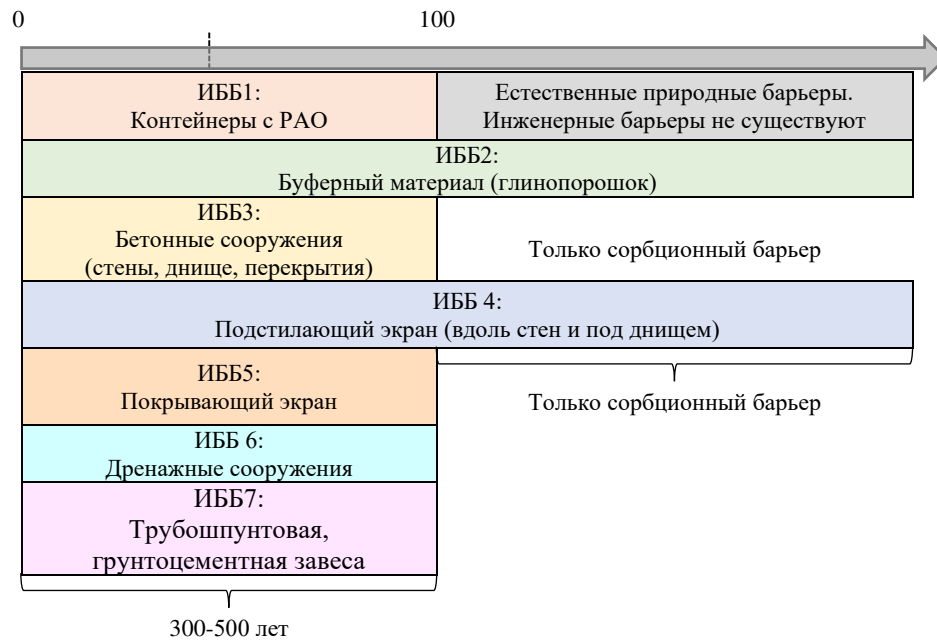


Рисунок 5.8 - Диаграмма одновременного «вступления в работу» всех инженерных барьеров безопасности. Наиболее консервативный сценарий.

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

Из рисунка 5.8 видно, что даже при консервативном сценарии переход на высокопрочные бетонные сооружения ИББ 3, дренаж ИББ 6 и грунтоцементная завеса ИББ 7 обеспечивают долгосрочную изоляцию РАО минимум на 300 лет, барьеры на основе природных глин и бентонита способны обеспечить изоляцию МС ППЗРО на срок до 500 лет.

Это важно учитывать при расчете уровней активности радионуклидов, вышедших из ППЗРО во внешнюю среду. За дополнительные 500 лет уровень их опасности снизится благодаря процессу радиоактивного распада.

Инженерные барьеры безопасности играют важную роль при обеспечении долговременной безопасности ППЗРО и реализации принципа многобарьерности. За счет создания описанной выше системы инженерных барьеров достигается следующее:

- предотвращение поступления атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод в ячейки захоронения РАО за счет мультибарьерной системы и покрывающего экрана при консервации и закрытии ППЗРО;
- предотвращение разрушения упаковок РАО от воздействия природных и техногенных процессов, за счет применения определенных строительных материалов и конструкций инженерных барьеров безопасности ППЗРО;
- структурная стабильность элементов системы захоронения, надежность покрывающего и подстилающего экранов за счет стабилизации температурных режимов захоронения РАО, увеличивающей устойчивость железобетонных конструкций упаковок РАО и элементов сооружения;
- сток и отвод атмосферных осадков от зоны захоронения РАО, за счет дренажной системы и функций консервирующего экрана;
- выполнение инженерными барьерами своих функций в период после закрытия ППЗРО без технического обслуживания и ремонта;
- обеспечение защиты от непреднамеренного вторжения или разрушения ППЗРО человеком, животными или растениями, сохранение информации о размещении ППЗРО (информационные сообщения, наличие в геологическом разрезе измененных и не характерных для участка размещения горных пород, отклонение показателей рельефа от естественных).

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5**

В главе рассмотрена система инженерных барьеров безопасности и ее функционирование в структуре пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО).

1. Изоляция РАО в ППЗРО, в соответствии с требованиями НП-055-14 [47], обеспечивается следующими инженерными барьерами безопасности, которые, по консервативной оценке, состоят из:

- металлических контейнеров, обеспечивающих удержание РАО на период сроком не менее 30-50 лет; или железобетонных контейнеров, обеспечивающих удержание РАО на период сроком до 300 лет;

- буферного материала на основе природных глин, заполняющего пространство в отсеках модульных сооружений и между контейнерами; время сохранения изолирующих функций – в течение не менее 300-500 лет;

- бетонных сооружений стен, нижнего и верхнего перекрытий ППЗРО, возведенных в соответствии с принятыми ГОСТами. Срок службы бетонных конструкций – 100 лет;

- глиняного экрана и бентонитовых матов по периметру (стены, дно) модульных сооружений ППЗРО; срок службы барьера в течение не менее 300-500 лет;

- покрывающего гидроизолирующего экрана, состоящего из (снизу вверх): глинистого гидроизолирующего экрана; дренажного слоя из гравийно-песчаной смеси; защитного слоя из дробленого камня; защитного слоя из суглинка и почвенно-растительного слоя. Покрывающий гидроизолирующий экран ППЗРО сохраняет назначенные свойства в течение, минимум 300-500 лет.

2. Для увеличения срока долговременной безопасности ППЗРО в работе включены дополнительные инженерные барьеры:

- трубошпунтовая завеса (срок эксплуатации до полного разрушения 400 лет) и грунтоцементная завеса (срок изоляции модульного сооружения до 1100 лет) вокруг модульных сооружений ППЗРО, которые могут возводиться как при строительстве, эксплуатации, так и при пассивном состоянии закрытого ППЗРО.

3. Для увеличения срока долговременной безопасности сооружений третьего

барьера (ИББЗ) следует перейти на применение бетонов, используемых для производства контейнеров РАО (типа НЗК-150-1,5П). При использовании бетона класса В50 (М700, ГОСТ 26633-2015 [75]), имеющего прочность на сжатие 70 МПа и плотность от 2,45 до 2,65 т/м<sup>3</sup>, марка бетона по морозостойкости и водонепроницаемости - не ниже F200 и W12, срок долговременной безопасности сооружений третьего барьера продлится более 300 лет. Все другие барьеры безопасности модульных сооружений ППЗРО имеют сроки долговременной безопасности не менее 300 лет.

4. С использованием метода комбинаторики выявлены наиболее опасные прогнозные сценарии выхода из строя инженерных барьеров безопасности, при которых разрушается наибольшее число ИББ: это ИББ 3 и ИББ 5 – выход из строя бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли) и покрывающего экрана. Для увеличения сроков долговременной безопасности ППЗРО требуется решать вопросы увеличения сроков эксплуатации ИББ 3 и ИББ 5. Это подтверждает необходимость перехода ИББ 3 на высокопрочные бетоны.

5. Моделирование сценариев выхода из строя ИББ от внешних воздействий в различных сочетаниях показало, что наиболее опасными сценариями, при которых в разрушение вовлекается наибольшее число ИББ, являются ИББ 3 и ИББ 5 – выход из строя бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли) и покрывающего экрана. Поэтому при решении задачи об увеличении сроков долговременной безопасности ППЗРО необходимо разрабатывать в первую очередь технические решения по увеличению сроков эксплуатации ИББ 3 и ИББ 5.

## 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/м<sup>3</sup>, 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/м<sup>3</sup>, 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 объёме 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  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с концентрацией ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , 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 ( $\rho=2,389 \text{ т/м}^3$ ,

$\sigma_{сж}=43,4$  МПа, W6, F300) на класс В70 ( $\rho=2,485$  т/м<sup>3</sup>,  $\sigma_{сж}=94,1$  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, ( $\rho=2,39$  т/м<sup>3</sup>, W6), толщина днища в проекте 1000 мм. При переходе на использование бетона класса В70 ( $\rho=2,48$  т/м<sup>3</sup>, 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, противофильтрационных свойств и характеристик струйной цементации достигается за счет оптимизации водоцементного отношения  $V/C=0,7$ , оптимального диаметра колонн = 0,8м, подбора эффективной скорости подачи раствора в грунтовый массив (100л/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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Информация с официального сайта <https://www.andra.fr/nous-connaître/histoire>.
2. Фото с сайта [https://manche.andra.fr/sites/manche/files/styles/content\\_image/public/2017-12/tumulus.jpg?itok=ATVicLwT](https://manche.andra.fr/sites/manche/files/styles/content_image/public/2017-12/tumulus.jpg?itok=ATVicLwT).
3. Фото с сайта [https://manche.andra.fr/sites/manche/files/styles/content\\_image/public/2017-12/00001399\\_couverture\\_du\\_csm.jpeg?itok=Q3KorOOl](https://manche.andra.fr/sites/manche/files/styles/content_image/public/2017-12/00001399_couverture_du_csm.jpeg?itok=Q3KorOOl).
4. Цебаковская Н.С., Капырин И.В., Уткин С.С., Медянцеv Н.В., Шамина А.В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО — М.: Изд-во «Комтехпринт», 2015. 208 с.
5. Фото с сайта [https://www.andra.fr/sites/default/files/styles/content\\_image/public/2018-02/00018311\\_centre\\_de\\_l\\_aube.jpeg?itok=s7GBj92X](https://www.andra.fr/sites/default/files/styles/content_image/public/2018-02/00018311_centre_de_l_aube.jpeg?itok=s7GBj92X).
6. Фото с сайта [https://aube.andra.fr/sites/aube/files/styles/content\\_image/public/2017-12/dji\\_0007.jpg?itok=yqFHE91l](https://aube.andra.fr/sites/aube/files/styles/content_image/public/2017-12/dji_0007.jpg?itok=yqFHE91l);
7. Информация с официального сайта <https://www.andra.fr/50-ans-du-centre-de-stockage-de-la-manche-1969-2019>.
8. Информация с официального сайта <https://www.andra.fr/avant-apres-levolution-en-images-des-centres-de-landra>.
9. Rapport d'information CSM 2019. SÛRETÉ NUCLÉAIRE & RADIOPROTECTION- ANDRA. 2019, 33 p.
10. Le Centre de stockage de l'Aube — Conception graphique et réalisation : Ping-Pong Graphique •Crédits photos et illustrations : Andra, P. Bourguignon, V. Duterme, A. de Henning, Les Films Roger Leenhardt, P. Maurein, L. Mignaux (MEDDTL), Samarkand, D. Vogel — ©Andra, 379 G, DCOM-14-0100, Mai 2014.
11. Фото с сайта [https://aube.andra.fr/sites/aube/files/2018-03/ouvrages\\_de\\_stockage.jpg](https://aube.andra.fr/sites/aube/files/2018-03/ouvrages_de_stockage.jpg).
12. Фото с сайта <https://www.entrepriseetdecouverte.fr/visite/andra-csa-centre-de-stockage-de-laube/>.

13. Фото с сайта [https://www.leparisien.fr/resizer/2\\_XzkIE3P-zJ-Qj7E\\_EMA4pqapk=/932x582/cloudfront-eu-central-1.images.arcpublishing.com/leparisien/LYJUQDK7BCHLDAFMLLZ3ZERLQ.jpg](https://www.leparisien.fr/resizer/2_XzkIE3P-zJ-Qj7E_EMA4pqapk=/932x582/cloudfront-eu-central-1.images.arcpublishing.com/leparisien/LYJUQDK7BCHLDAFMLLZ3ZERLQ.jpg).
14. Фото с сайта <https://www.messortiesculture.com/storage/tourcovers/4145.jpg?1601291498>.
15. Les sites de stockage de déchets radioactifs (Séminaire ANCCLI - CLIS de Bure - IRSN 8 Avril 2013) — ©Andra, DMR/IP/13-0181, 8 Avril 2013.
16. Фото с сайта <https://cli-soulaines.fr/site-de-landra/presentation-de-landra-et-du-csfma/>.
17. Информация с официального сайта <https://www.enresa.es/esp/inicio/conozca-enresa/creacion-de-enresa>.
18. Real Decreto 1522/1984 de 4 de julio [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-1984-18431](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1984-18431).
19. Revista Dinamo № 14 – SUPLEMENTO ESPECIAL 25 ANIVERSARIO EL CABRIL, Dynamo CLM, Numero especial 14, 59 p.
20. Фото с сайта [https://www.eldiario.es/economia/enresa-planea-ampliar-almacen-residuos-radiactivos-cordoba-suelo-no-urbanizable\\_1\\_6282699.html](https://www.eldiario.es/economia/enresa-planea-ampliar-almacen-residuos-radiactivos-cordoba-suelo-no-urbanizable_1_6282699.html).
21. Фото с сайта <https://www.publico.es/actualidad/vivir-media-hora-unico-cementerio-nuclear-espana.html>.
22. Фото с сайта <https://www.catedraenresauco.com/instalaciones-de-gestion-y-tratamiento-de-residuos-radiactivos-en-espana/>.
23. Фото с сайта <https://www.lanzadigital.com/provincia/de-el-cabril-a-villar-de-canas-un-cementerio-nuclear-en-continuo-estado-de-control/>.
24. Фото с сайта [https://na.unep.net/geas/getuneppagewitharticleidsript.php?article\\_id=70](https://na.unep.net/geas/getuneppagewitharticleidsript.php?article_id=70).
25. Sixth General Radioactive Waste Plan [6th GRWP] - Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, ENRESA, June 2006, 251 p.
26. Фото с сайта <https://www.enresa.es/eng/index/about-enresa/press/177-el-cabril-realiza-su-simulacro-anual-de-emergencia-con-dos-escenarios-simultaneos>.

27. Фото с сайта <https://www.lainformacion.com/empresas/la-factura-francesa-por-la-basura-nuclear-suma-15-millones-desde-el-mes-de-junio/6340769/>.
28. Фото с сайта <https://www.catedraenresauco.com/gestion-de-residuos-radiactivos/captura-de-pantalla-2016-01-13-a-las-19-04-34/>.
29. Информация с официального сайта <https://rhk.hu/>.
30. Статья Püspökszilágy Radioactive Waste Treatment and Disposal Facility (1976 - 1996) <https://www.iaea.esrc.unimelb.edu.au/biogs/E000020b.htm>.
31. Фото с сайта <https://rhk.hu/storage/207/4.png>.
32. Фото с сайта <https://rhk.hu/storage/203/1.png>.
33. Фото с сайта <https://energiaklub.hu/en/news/cracks-a-little-oozes-a-little-but-its-ours-the-puspokszilagy-atomic-graveyard-4686..>
34. Фото с сайта <https://rhk.hu/timeline/radioactive-waste-treatment-and-disposal-facility>.
35. Фото с сайта <https://xpatloop.com/channels/2019/02/nuclear-waste-dump-in-hungary-said-to-be-leaking.html>.
36. Информация с официального сайта <https://www.norao.ru/>.
37. Федеральный закон "Об использовании атомной энергии" от 21.11.1995 № 170-ФЗ.
38. Федеральный закон "Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 11.07.2011 № 190-ФЗ.
39. Распоряжение Правительства РФ от 20 марта 2012 г. № 384-р «О национальном операторе по обращению с радиоактивными отходами».
40. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».
41. Фото и информация с сайта <https://www.norao.ru/press/news/2498/>.



42. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию пункта хранения радиоактивных отходов (стационарные объекты и сооружения, предназначенные для захоронения радиоактивных отходов) в г. Новоуральске Свердловской области (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) Том 1.
43. Фото собственность ФГУП «НО РАО», фотограф Медянцев Н.В., Лытенкова Т.В.
44. СП 2.6.1.799-99 Классификация радиационных объектов по потенциальной опасности.
45. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский городской округ (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) – ФГУП «НО РАО», Москва, 2018. 296 с.
46. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. НП-100-17.
47. НП- 055 -14 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».
48. Игин И.М., Минин А.В., Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Трофимова Ю.В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации. Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы», №3, 2022г. с. 50-60.
49. ГОСТ 51824-2001 Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона. Общие технические требования.
50. СП 63.13.330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. основные положения.
51. ГОСТ 27751.2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

52. ГОСТ 31384-2008 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.
53. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14.
54. Анисимов Н.А., Куваев А.А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 97—106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.
55. СП 48.13330.2011 Организация строительства.
56. ГОСТ 25192.2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования.
57. Сорокин В.Т. Стратегия и методология обращения с низко- и среднеактивными отходами на завершающих стадиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург 2008
58. Сорокин В. Т., Гатауллин Р. М., Свиридов Н. В., Павлов Д. И. Долговечность железобетонных контейнеров типа НЗК-150-1,5П при захоронении радиоактивных отходов 2 класса // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 37—49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.
59. ГОСТ 12730.5-84. Методы определения водонепроницаемости.
60. Бамборин М.Ю., Ярцев Д.В., Колесников С.А. Влияние высокотемпературной обработки на рентгеноструктурные характеристики и теплопроводность углерод-углеродных композиционных материалов. Новые огнеупоры – 15/08/2013 – № 8 – С. 27-32.
61. Бамборин М.Ю., Колесников С.А. Формирование теплопроводности углерод-углеродных композиционных материалов. Новые огнеупоры – 15/02/2013 – № 2 – С. 22-27.
62. Бамборин М.Ю., Воронцов В.А., Колесников С.А. Исследование формирования физического взаимодействия на границе структурных фаз углеродная матрица - углеродное волокно электрофизическими методами в углерод-углеродных композиционных материалах с различным уровнем плотности. Новые огнеупоры – 15/02/2014 – № 2 – С. 22-28.

63. Бамборин М.Ю., Колесников С.А. Исследование влияния высокотемпературной обработки на окислительную стойкость углерод-углеродных композиционных материалов. Новые огнеупоры – 15/06/2014 – № 6 – С. 46-49.
64. Чеблакова Е.Г., Бамборин М.Ю., Максимова Д.С., Гареев А.Р., Колесников С.А. Повышение огнеупорности углеродных композиционных материалов за счет ограничения гетерогенной поверхности окисления. Новые огнеупоры – 2016 – N 4 – С. 13-23.
65. Колесников С.А., Бамборин М.Ю., Воронцов В.А., Проценко А.К., Чеблакова Е.Г. Формирование уровня теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала/ Новые огнеупоры. – 2017. – № 2. – С. 30-38.
66. Ярцев Д.В., Бамборин М.Ю., Колесников С.А., Чеблакова Е.Г., Клеусов Б.С. Поверхностное удельное электросопротивление углерод-углеродных композиционных материалов, полученных по технологии изостатической карбонизации. Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 4. – С. 41-46.
67. Yartsev, D.V., Bamborin, M.Y., Kolesnikov, S.A., Cheblakova, E.G., Kleusov, B.S. Surface Electrical Resistivity of Carbon–Carbon Composite Materials Obtained via Iso-static Carbonization Technology, Journal of Surface Investigation [this link is disabled](#), 2021, 15(2), стр. 345–349.
68. 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). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2024. – № 2, С. 3-10.
69. 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). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2024. – № 2, С. 11-15.

70. Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Спешилов 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). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2024. – № 2, С. 21-25.
71. Сангалов Ю.А., Карчевский С.Г., Ионов В.И. Пластификация серы. Физико-химические аспекты. 2012. № 1. С. 11-20.
72. Дорошенко С.Н. О вкладе горно-металлургической промышленности в развитие Арктики. Научные исследования современных проблем развития России: Диалог поколений: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции молодых ученых Санкт-Петербургского государственного экономического университета. С. 101-106
73. Болонев В.В., Мартыненко В.В. Применение серобетонной закладки в горных работах. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Изд.: Наука и Просвещение: – Пенза. 2021. С. 15-19.
74. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона. Стройиздат, М.—Л., 1941.
75. ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
76. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
77. ГОСТ 8269.1-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы химического анализа.
78. ГОСТ 26644-85 Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона. Технические условия.
79. ГОСТ 32495-2013 Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия.
80. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия.
81. ГОСТ 5578-94 Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия.

82. ГОСТ 25592-91 Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия.
83. СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85.
84. СП 131.13330.2018 Строительная климатология.
85. Баженов, Ю.М. Технология бетонов: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб. - М.: Высш. шк., 1987. — 415 с.
86. Захаров, С.А. Оптимизация составов бетонов высокоэффективными оликарбоксилатными пластификаторами // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 42–43.
87. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1990. – 500 с.
88. Бабас, Ш.Т. Особенности технологии получения и исследование свойств высокопрочных бетонов с добавками суперпластификаторами / Ш.Т. Бабас // – 1979 г.
89. Шейкин Ю.В., Чеховский А.Е., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
90. Изотов В.С., Селиверстова О.В., Краснова Т.А. Влияние гиперпластификатора на основе полиакрилатов на прочность, плотность и водонепроницаемость бетона // Известия Казанского государственного архитектурно–строительного университета. – 2010. – № 1(13). – С. 292–295.
91. Дружинкин С.В., Немыкина Д.А., Краснова Е.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона Инженерный вестник Дона, №2 (2018) – 10 с.
92. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Госстройиздат, 1961. – 259 с.
93. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. Минск: БНТУ, 2013, 310 с
94. Баженов, Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны /. Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2006. – 368 с.

95. Давидсон, М.Г. Водонепроницаемый бетон / М.Г. Давидсон. – Л.: Лениздат, 1965. – 654 с.-
96. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Лопатина Ю.Ю., Халезин С.В. О морозостойкости бетонов с суперпластификаторами // Наукоеведение. Том 8, №5 (2016).
97. - Горчаков, Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с
98. Шейкин, А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. – Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.
99. Ковшар С.Н., Бабицкий В.В. Проектирование состава бетона с учётом его морозостойкости // Вестник БНТУ. 2010. №3. С. 15-20.
100. Серова Р.Ф., Кожас А.К. Влияние модифицирования на морозо- и коррозиестойкость цементных материалов // Фундаментальные исследования. 2012. №9. С. 690-693.
101. Степанов С.В., Морозов Н.М., Хаматова А.Р. Влияние расхода цемента и добавок на пористость бетона // ИННОВАЦИОННАЯ НАУКА. 2015. №11 С. 121-123.
102. Баранников М.В., Поляков И.В., Поляков В.С., Николаева О.И., Виноградова Л.А. Применение полимерных дисперсий в комплексных добавках для тяжелого бетона // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2022. Т. LXVI. №. 2. С. 33-38.
103. Демьяненко О. В., Куликова А. А., Копаница Н. О, Петров. А. Г. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 5(749).
104. Курбатова И. И. Современные методы химического анализа строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1972. – 112 с.
105. Алексеев С. Н Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

106. Алексеев С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1978. – 205 с.
107. Гатауллин Р.М., Давиденко Н.Н., Свиридов Н.В., Сорокин В.Т., Медеяев И.А., Перегудов Н.Н., Дёмин А.В., Баринов А.С., Волков А.С., Лащеннов С.М. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Логос, Москва, 256 с., 2012.
108. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия.
109. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия.
110. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
111. ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности.
112. ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения.
113. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
114. ГОСТ 10060 Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования.
115. Lori E. Tunstall, M. Tyler Ley, George W. Scherer. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. Cement and Concrete Research. Volume 150, December 2021, 106557. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106557
116. Гузеев, Е.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с учетом кинетики сульфатной коррозии бетона / Е.А. Гузеев, Н.В. Савицкий, А.А. Тытюк // Защита бетона и железобетона от коррозии: сб. науч. тр. / под ред. С.Н. Алексеева, В.Ф. Степановой. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. – С. 59-66.
117. Отчёт по теме: «Прогноз фактических сроков службы подземных железобетонных конструкций после длительной эксплуатации в конкретных условиях г. Волгодонск». НИИЖБ, Москва, 24 с., 1986.
118. Рекомендации по методам определения коррозионной стойкости бетона. НИИЖБ, Москва, 25 с., 1988.

119. ГОСТ 27677-88. Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний.
120. Чертёж шпунтового ограждения Шпунт Ларсена Л5-УК  
<http://beregstal.ru/catalog1/larsen-shpun/shpunt-larsena-tehnicheskie-harakteristiki/>
121. ГОСТ Р 57365-2016/EN 12063:1999 Стены шпунтовые. Правила производства работ.
122. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф. и др. Технология металлов и материаловедение М.: Металлургия, 1987.- 800 с.
123. Технические условия ТУ 2229-005-11687721-01 Комплексная добавка для струйной цементации "КДСЦ" (с изм. №1, №2, №3, №4).
124. Презентация Руководителя проекта отдела строительных проектов Шишкина В.Я. «Разработка технологии устройства противofильтрационных завес в агрессивных средах» АО «НИИГрафит», 20 л.
125. Фото собственности ИП Шишкин В.Я., фотограф Шишкин В.Я.
126. Чертёж трубного шпунта из стеклопластика. Заявка на проект НИОКР в ЕОТП «Разработка технологии устройства противofильтрационных завес в агрессивных средах», 17 л.-
127. А. А. Евдокимов, А. П. Петрова, К. А. Павловский, И. Н. Гуляев. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего. Научно-технический журнал "ТРУДЫ ВИАМ". 2021. №3. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.
128. Каталог продукции (буроинъекционные анкерные системы) <https://kvl-anchor.ru/catalog.pdf>.
129. Каталог продукции (буроинъекционные анкерные системы) <https://www.supfrp.com/item/supfrp-gfrp-reinforcement-systems/supfrp-gfrp-sda-bolt>.
130. Программный комплекс для расчета гибких подпорных конструкций WALL-3 в составе WALL-3 версия 2013. Руководство пользователя 46.00001.76579617-02 90 01. Сертификат соответствия №РОСС RU. СП09.Н00137 №1814178.



131. Б. И. Далматов, В. Н. Бронин, В. Д. Карлов, Р. А. Мангушев, И. И. Сахаров, С. Н. Сотников, В. М. Улицкий, А. Б. Фадеев. - М.: Изд-во АСВ; СПбГАСУ, 2002, 392 с.: ил.
132. Р. А. Мангушев, Р. А. Усманов, Геотехнические методы подготовки строительных площадок, Учебное пособие, Санкт-Петербург, 2012. - 30 с.
133. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты: Уч. Пособие для строит. спец. Вузов. Под ред. С.Б. Ухова. – 4-е изд. Стер. – М.: Высш. шк., 2007. – 566 с.
134. Галкин А. Н., Акулевич А. Ф., Павловский А. И., Галезник О. И. Техногенные грунты - Москва: Вышэйшая школа, 2020. - 192 с. - ISBN 978-985-06-2579-3.
135. Белин В.А., Кутузов Б.Н. Проектирование и организация взрывных работ, Горная книга, Москва, 2012 г., 416 с.
136. Макаров Ю.А. Основы строительного дела: учеб. пособие / под ред. Г.Н. Мельникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.– 219 с.: ил.
137. Отчёт НИОКР по теме: «Преобразование свойств слабонесущих водонасыщенных грунтов оснований основных и вспомогательных зданий и сооружений Курской АЭС-2».
138. А.М. Гальперин, В.С. Зайцев Геология: Часть IV. Инженерная геология: Учебник для вузов. – Москва. Горная книга (МГГУ), 2009. - 559 с. - ISBN 978-5-98672-158-3.
139. Д.М. Тимофеев Оценка эффективности применения грунтоуплотняющих машин и механизмов, Инженерный вестник Дона, №1 (2018).
140. Адамович А.Н. и Колтунов Д.В. Цементация оснований гидросооружений, М. — Л. 1953.
141. Ржаницын Б. А., Силикатизация песчаных грунтов, М., 1949;
142. Шестопалова Н. В. Архитектурные конструкции реконструируемых зданий и сооружений: Учебное пособие ИРНИТУ, 2019, 216 с.
143. Плешко М. С., Плешко М. В. Механика грунтов. Основания и фундаменты: Учебное пособие РГУПС, 2017, 94 с.

144. Крупина Н. В., Иванов С. А., Крупин С. В. Основы проектирования автомобильных дорог в сложных условиях: учеб. пособие, КузГТУ, 2019, 97 с.
145. Литвинов И. М., Термическое укрепление просадочных лёссовых и других грунтов в основании различных зданий и сооружений, К., 1955.
146. Угляница А.В., Гилязидинова Н.В., Санталова Т.Н. Укрепление оснований и фундаментов, учебное пособие Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, 2014, 345 с.
147. Ишутина С.А. Применение гидроструйной цементации. Интерактивная наука. 2016. № 1. С. 92-94.
148. Горбунов И.А., Кудрявцев С.А. Анализ влияния струйной цементации слабых грунтов на напряженно-деформированное состояние основания фундамента. Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 426-431.
149. Шишкин В.Я., Погорелов А.Е. Применение струйной геотехнологии при реконструкции объектов в условиях городской застройки. Интеграл. 2011. № 3. С. 124-128.
150. СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты».
151. Презентация Dipl. Geol. Gero Kühn, Geotechnischer Berater «Problematische Baugründe vom Geologen erklärt» Kühn Geoconsulting GmbH, 34 л. <https://www.rehau.com/downloads/771106/02-problematische-baugruende-vom-geologen-erklaert.pdf>
152. Презентация Руководителя проекта «Строительный кластер» Конусевича В.И. «Применение в строительстве новых технологий с использованием композиционных материалов» АО «НИИГрафит», 13 л., [http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/0PORTAL/AtomStroyStandart-2014/Kunusevich\\_inn\\_Conf.pdf](http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/0PORTAL/AtomStroyStandart-2014/Kunusevich_inn_Conf.pdf).
153. Информация с сайта группы компаний Eurasia Group <https://eurasia-group.ru/catalog/oborudovanie/burovye-oborudovanie/preventory-protivovybrosovy/universalnye-preventory/>.
154. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений».
155. СП 24.13330.2011 "СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты»

156. СП 291.1325800.2017 «Конструкции Грунтоцементные армированные».
157. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов, ОАО «Издательство «Стройиздат», 2010. – 226 с.
158. Патент № RU 105917. Калибратор для определения технологических параметров выполнения колонн методом струйной геотехнологии.
159. Черняков А.В. Оценка долговечности грунтобетона в струйной технологии // Строительные материалы. 2011. № 10 (682). С. 59-63.
160. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб.: Наука, 2011 – 1158 с.
161. Коваленко А.В. и др. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде COMSOL Multiphysics 5.2. Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017.
162. D. Schulze-Makuch/ Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior. GROUND WATER 43, no. 3: 443–456.
163. Технологическая механика закрепления и оценки качества глинистых грунтов: моногр. / И.Х. Идрисов, Н.И.Макридин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 174 с.

### Приложение А

Таблица 1. Рекомендуемый перечень контейнеров для захоронения РАО классов 3 и 4 в проектируемом ППЗРО [45]

№ п/п	Наименование контейнеров	Модификация (условное обозначение)	Описание наружной формы, масса брутто, внутр. объём	Материал конструкции, защиты; толщина защиты, мм	Наружные размеры, мм Д/Ш/В Д(Ø)/В	Класс РАО	
1	2	3	4	5	6	7	
1	Контейнер защитный невозвратный	НЗК-150-1,5П, НЗК-150-1,5П (С) НЗК-РАДОН, НЗК-МР, НЗК-МР-150, НЗК-МР-150 (ИОС), НЗК-МР-150-1, НЗК- МР-150-2 (ИОС), УКТА1А-150	параллелепипед; 5600 – 7800 кг; 1,5 – 1,9 м <sup>3</sup>	специальный железобетон, 110 – 150	1650/1650/137 5	3	4
2	Железобетонный защитный контейнер для низко-активных твердых РАО	ЖЗК-1	параллелепипед; до 7800 кг; 1,9 м <sup>3</sup>	специальный железобетон корпус 150, днище 160, крышка 220	1750/1750/1340	4	
3	Железобетонный защитный контейнер для среднеактивных РАО	ЖЗК-2	параллелепипед; до 8700 кг; 1,75 м <sup>3</sup>	специальный железобетон корпус 200 днище 220 крышка 220	1750/1750/1340	3	
4	Контейнер защитный железобетонный	ЖБУ	параллелепипед; до 4500 кг; 1,0 м <sup>3</sup>	специальный железобетон корпус 120 днище 120	1200/1200/1430	3	4

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
5	Контейнер защитный железобетонный для отвержденных жидких отходов	ЖЗК	параллелепипед; 4900 кг; 0,96 м <sup>3</sup>	тяжелый бетон, стенка 120, днища 120, крышки 180	1200/1200/1450	3
6	Контейнер защитный невозвратный	НЗК-II	параллелепипед; 7800 кг; 1,5 м <sup>3</sup>	специальный железобетон, 150	1750/1750/1375	3
7	Контейнер типа I	КРАД-1,36, МК-1.36	8-гранная призма; до 3000 кг; 1,36 м <sup>3</sup>	Ст3, корпус 4 днище 4 крышка 2	1250/1250/800	4
8	Контейнер типа II	КРАД-3,0	параллелепипед; до 6 000 кг; 3 м <sup>3</sup>	Ст3, корпус 2 днище 5 крышка 4	2620/1430/1080	4
9	Контейнер металлический защитный	КМЗ, КМЗ-РАДОН, МК-3.1	параллелепипед; до 10 000 кг; 3.1 м <sup>3</sup>	Ст3, корпус 5 днище 8 крышка 10	1650/1650/1375	3 4
10	Промышленная упаковка - бочка металлическая	ПУ-2, А.11.1107.000, А.11.1108.000; А.00.659.000, А.00.617.000; А.2201.00.000. 057.1.2000.00.00.00; А.110.000, А.00.884.000; Л.11.222.00.000, А.11.10028.000; УАХМ23.010.00.000, ГОСТ 13950-91	бочка с доньями до 600 кг; 0,216 м <sup>3</sup>	Ст3, 1,5-4	Ø566-600/853-918	3 4
11	Фильтр-контейнер	цилиндр 3800 кг, 0,75 м <sup>3</sup>		12Х18Н10Т	Ø904/В1132	3
12	Специализированный контейнер	БИГ-БЭГ	Контейнер; до 4500 кг	Полипропиленовая ткань	-	4

Таблица 2. Форма и химический состав РАО [45]

п/п	Форма РАО	Химический состав
1	металл (сталь нержавеющая, лом черных металлов, лом цветных металлов, отходы плавильного производства (включая шлаки, футеровку))	Неорганические соединения: металлы, сплавы, оксиды
2	сорбенты и фильтроматериалы, смолы отработанные ионообменные	Органические и неорганические соединения
3	теплоизоляционные материалы неорганические	Минералоподобные неорганические соединения(пористые)
4	изделия из стекла и керамики, лабораторная посуда	Минералоподобные неорганические соединения (плотные)
5	зола, сажа	Неорганические соединения: соли, оксиды
6	графит	Неорганические соединения: углерод, соли, оксиды углерода
7	солевой плав	Неорганические соли ( $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Al}^{3+}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{BO}_3^{3-}$ , $\text{SiO}_2$ )
8	рудные материалы, стройматериалы, строительный и прочий мусор, загрязненный грунт	Неорганические соединения: соли, оксиды
9	полимеры, пластмасса	Органические соединения
10	древесина, бумага, картон, спецодежда и другие средства индивидуальной защиты, обувь, обтирочные материалы, ветошь, вата, фильтроэлементы (фильтровальная ткань) фильтров вентиляции и т.п.	Органические соединения: углерод, соли, оксиды
11	Отвержденные методами цементирования, битумирования, включения в полимерную матрицу и остекловывания, ЖРО различного генезиса	
12	Отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения (ОЗИИИ)	Неорганические соединения: металлы (сплавы), соли, оксиды.

Таблица 3. Характеристика упаковок РАО 3 и 4 класса, нормы загрузки контейнеров (бочек) и объемная плотность ядерных делящихся нуклидов на в РАО (на 1 см<sup>2</sup>) [45]

Контейнер	Внутренний объём контейнера, м <sup>3</sup>	Объёмная плотность 235U, г/см <sup>3</sup>	Норма загрузки 235U, г	Объёмная плотность 235U+Pu, г/см <sup>3</sup>	Норма загрузки 235U, г
ЖБУ	0,96	8x10 <sup>-5</sup>	76	5,7x10 <sup>-5</sup>	54
ЖЗК	0,96	8x10 <sup>-5</sup>	76	5,7x10 <sup>-5</sup>	54
ЖЗК-1	1,9	8x10 <sup>-5</sup>	152	5,7x10 <sup>-5</sup>	108
ЖЗК-2	1,5	8x10 <sup>-5</sup>	120	5,7x10 <sup>-5</sup>	85
НЗК-II	1,5	8x10 <sup>-5</sup>	120	5,7x10 <sup>-5</sup>	85
НЗК-МР	1,9	8x10 <sup>-5</sup>	152	5,7x10 <sup>-5</sup>	108
НЗК-Радон	1,9	8x10 <sup>-5</sup>	152	5,7x10 <sup>-5</sup>	108
НЗК-150-1,5П	1,5	8x10 <sup>-5</sup>	120	5,7x10 <sup>-5</sup>	85
КМЗ	3,1	8x10 <sup>-5</sup>	248	5,7x10 <sup>-5</sup>	177
Крад-1,36	1,36	8x10 <sup>-5</sup>	108	5,7x10 <sup>-5</sup>	77
Крад-3,0	3,0	8x10 <sup>-5</sup>	270	5,7x10 <sup>-5</sup>	180
Клеть с 4 бочками	Бочка: 0,2	8x10 <sup>-5</sup>	16 (4 бочки в клети - 64)	5,7x10 <sup>-5</sup>	11 (4 бочки в клети – 45)
Клеть с 2 ФК	ФК: 0,12	8x10 <sup>-5</sup>	9 (2 ФК в клети – 19)	5,7x10 <sup>-5</sup>	6 (2 ФК в клети – 12)
Биг-бэг	1,17	8x10 <sup>-5</sup>	93	5,7x10 <sup>-5</sup>	66
Биг-бэг	1,28	8x10 <sup>-5</sup>	102	5,7x10 <sup>-5</sup>	72

262

Приложение Б

Таблица 1. Показатели составов бетонов с добавлением добавок на основе нафталинсульфаната и поликарбоксилата

№№	Состав бетона на 1 м³						Плотность, кг/м³	Объёмная масса 1 м³, кг	В/Ц, %	Подвижность, ОК (Осадка конусом), см	Сокращенное названия состава
	Марка цемента	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель	Жидкий наполнитель							
					Масса, кг	% от массы цемента					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода, л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>						
1	200	900	920	180	2,40	1,2	2176	2202	0,90	19	ЦЕМ I 42,5Н+КИВН
2	220	900	920	180	2,64	1,2	2196	2223	0,82	18	
3	240	900	920	180	2,88	1,2	2216	2243	0,75	17	
4	260	880	940	180	3,12	1,2	2236	2263	0,69	18	
5	280	860	960	180	3,36	1,2	2256	2283	0,64	18	
6	310	825	980	185	3,72	1,2	2276	2304	0,60	19	
7	340	810	1000	190	4,08	1,2	2316	2344	0,56	19	
8	380	780	1050	190	5,32	1,4	2376	2405	0,50	19	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода, л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>						
1	210	825	980	185	2,73	1,3	2176	2203	0,88	19	ЦЕМ I 42,5Н+РИВН
2	230	825	980	185	2,99	1,3	2196	2223	0,80	18	
3	250	825	980	185	3,25	1,3	2216	2243	0,74	17	
4	270	805	1000	185	3,51	1,3	2236	2264	0,69	18	
5	290	785	1020	185	3,77	1,3	2256	2284	0,64	18	
6	320	750	1040	190	4,16	1,3	2277	2304	0,59	19	
7	360	735	1050	195	5,04	1,4	2317	2345	0,54	19	
8	400	705	1100	195	6	1,5	2377	2406	0,49	19	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода, л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>						
1	180	950	900	170	1,98	1,1	2176	2202	0,94	19	ЦЕМ I 42,5Н+КГВН
2	200	950	900	170	2,2	1,1	2196	2222	0,85	18	
3	220	950	900	175	2,42	1,1	2220	2247	0,80	17	
4	240	900	940	175	2,64	1,1	2231	2258	0,73	18	
5	270	890	940	180	2,97	1,1	2256	2283	0,67	18	
6	300	860	960	180	3,6	1,2	2276	2304	0,60	19	
7	320	850	980	185	3,84	1,2	2311	2339	0,58	19	
8	370	840	1020	185	4,81	1,3	2391	2420	0,50	19	
9	400	820	1040	190	5,2	1,3	2426	2455	0,48	18	
10	430	800	1060	190	6,02	1,4	2456	2486	0,44	18	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода, л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>						
1	200	880	960	190	2,60	1,3	2206	2233	0,95	17	ЦЕМ I 42,5Н+РГВН
2	220	880	960	190	2,86	1,3	2226	2253	0,86	18	
3	240	880	960	195	3,12	1,3	2251	2278	0,81	17	
4	260	830	1000	195	3,38	1,3	2261	2288	0,75	18	



Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5	290	820	1000	200	3,77	1,3	2286	2314	0,69	18		
6	320	790	1020	200	4,16	1,3	2306	2334	0,63	19		
7	340	780	1040	195	4,76	1,4	2331	2360	0,57	19		
8	390	770	1080	195	5,46	1,4	2411	2440	0,50	19		
9	420	750	1100	200	6,30	1,5	2447	2476	0,48	18		
10	450	730	1110	200	6,75	1,5	2467	2497	0,44	18		
	ЦЕМ I 52,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b> , л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>							ЦЕМ I 52,5Н+КИВН
1	190	900	930	180	2,28	1,2	2176	2202	0,95	17		
2	210	900	930	180	2,52	1,2	2196	2223	0,86	18		
3	230	900	930	180	2,76	1,2	2216	2243	0,78	17		
4	250	880	950	180	3,00	1,2	2236	2263	0,72	18		
5	270	860	970	180	3,24	1,2	2256	2283	0,67	18		
6	300	825	990	185	3,60	1,2	2276	2304	0,62	19		
7	330	810	1010	190	3,96	1,2	2316	2344	0,58	19		
8	370	780	1060	190	4,44	1,2	2376	2404	0,51	19		
	ЦЕМ I 52,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b> , л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>							ЦЕМ I 52,5Н+РИВН
1	200	825	990	185	2,6	1,3	2176	2203	0,93	17		
2	220	825	990	185	2,86	1,3	2196	2223	0,84	18		
3	240	825	990	185	3,12	1,3	2216	2243	0,77	17		
4	260	805	1010	185	3,38	1,3	2236	2263	0,71	18		
5	280	785	1030	185	3,64	1,3	2256	2284	0,66	18		
6	310	750	1050	190	4,03	1,3	2276	2304	0,61	19		
7	350	735	1060	195	4,9	1,4	2317	2345	0,56	19		
8	390	705	1110	195	5,85	1,5	2377	2406	0,50	19		
	ЦЕМ I 52,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b> , л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>							ЦЕМ I 52,5Н+КГВН
1	170	960	900	170	1,87	1,1	2175	2202	1,00	17		
2	190	960	900	170	2,09	1,1	2195	2222	0,89	18		
3	210	960	900	175	2,31	1,1	2220	2247	0,83	17		
4	230	910	940	175	2,53	1,1	2230	2258	0,76	18		
5	260	900	940	180	2,86	1,1	2255	2283	0,69	18		
6	290	870	960	180	3,48	1,2	2276	2303	0,62	19		
7	310	860	980	185	3,72	1,2	2311	2339	0,60	19		
8	360	850	1020	185	4,68	1,3	2391	2420	0,51	19		
9	390	830	1040	190	5,07	1,3	2426	2455	0,49	18		
10	420	810	1060	190	5,88	1,4	2456	2486	0,45	18		
	ЦЕМ I 52,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b> , л	Добавка пластификатор: <b>нафталинсульфанат</b>							ЦЕМ I 52,5Н+РГВН
1	190	890	960	190	2,47	1,3	2206	2232	1,00	17		
2	210	890	960	190	2,73	1,3	2226	2253	0,90	18		
3	230	890	960	195	2,99	1,3	2251	2278	0,85	17		
4	250	840	1000	195	3,25	1,3	2261	2288	0,78	18		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	280	830	1000	200	3,64	1,3	2286	2314	0,71	18	5
6	310	800	1020	200	4,03	1,3	2306	2334	0,65	19	
7	330	790	1040	195	4,62	1,4	2331	2360	0,59	19	
8	380	780	1080	195	5,32	1,4	2411	2440	0,51	19	
9	410	760	1100	200	6,15	1,5	2446	2476	0,49	18	
10	440	740	1110	200	6,60	1,5	2467	2497	0,45	18	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>карьерный</b> ,	Щебень <b>известняк</b>	<b>Вода</b>	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						ЦЕМ I 42,5Н+КИВП
	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b>	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	210	805	980	205	1,05	0,5	2139	2201	0,98	19	ЦЕМ I 42,5Н+РИВП
2	230	805	980	205	1,15	0,5	2159	2221	0,89	18	
3	250	805	980	205	1,25	0,5	2178	2241	0,82	17	
4	270	785	1000	205	1,35	0,5	2198	2261	0,76	18	
5	290	765	1020	205	1,45	0,5	2218	2281	0,71	18	
6	320	730	1040	210	1,6	0,5	2237	2302	0,66	19	
7	360	715	1050	215	1,8	0,5	2276	2342	0,60	19	
8	400	685	1100	215	2,4	0,6	2335	2402	0,54	19	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b>	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	360	860	1000	175	1,62	0,4	2389	2397	0,49	19	ЦЕМ I 42,5Н+КГВП
2	385	840	1000	175	1,73	0,4	2395	2402	0,45	19	
3	410	810	1060	170	2,05	0,5	2445	2452	0,41	19	
4	430	780	1080	170	2,15	0,5	2455	2462	0,40	18	
5	440	780	1080	170	2,42	0,5	2465	2472	0,39	18	
6	445	760	1100	165	2,45	0,5	2465	2472	0,37	17	
7	450	740	1120	165	2,70	0,6	2470	2478	0,37	17	
8	460	730	1130	165	2,76	0,6	2480	2488	0,36	16	
9	480	720	1130	160	3,36	0,6	2486	2493	0,33	16	
	ЦЕМ I 42,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b>	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	200	865	960	205	1,00	0,5	2169	2231	1,03	17	ЦЕМ I 42,5Н+РГВП
2	220	865	960	205	1,10	0,5	2188	2251	0,93	18	
3	240	865	960	210	1,20	0,5	2212	2276	0,88	17	
4	260	815	1000	210	1,30	0,5	2222	2286	0,81	18	
5	290	805	1000	215	1,45	0,5	2247	2311	0,74	18	
6	320	775	1020	215	1,60	0,5	2266	2332	0,67	19	
7	340	765	1040	215	1,70	0,5	2296	2362	0,63	19	
8	390	755	1080	215	2,34	0,6	2374	2442	0,55	19	
9	420	735	1100	215	2,52	0,6	2403	2473	0,51	18	
10	450	715	1110	215	2,70	0,6	2423	2493	0,48	18	
	ЦЕМ I 52,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	<b>Вода</b>	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	210	805	980	205	0,945	0,4	2139	2201	0,98	19	ЦЕМІ52,5Н+КІВП
2	230	805	980	205	1,035	0,4	2159	2221	0,89	18	
3	250	805	980	205	1,125	0,4	2178	2241	0,82	17	
4	270	785	1000	205	1,215	0,4	2198	2261	0,76	18	
5	290	765	1020	205	1,305	0,4	2217	2281	0,71	18	
6	320	730	1040	210	1,44	0,4	2237	2301	0,66	19	
7	360	715	1050	215	1,62	0,4	2276	2342	0,60	19	
8	400	685	1100	215	1,8	0,4	2335	2402	0,54	19	
	ЦЕМ І 52,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>известняк</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	210	805	980	205	0,945	0,4	2139	2201	0,98	19	ЦЕМІ52,5Н+РІВП
2	230	805	980	205	1,035	0,4	2159	2221	0,89	18	
3	250	805	980	205	1,125	0,4	2178	2241	0,82	17	
4	270	785	1000	205	1,215	0,4	2198	2261	0,76	18	
5	290	765	1020	205	1,305	0,4	2217	2281	0,71	18	
6	320	730	1040	210	1,44	0,4	2237	2301	0,66	19	
7	360	715	1050	215	1,62	0,4	2276	2342	0,60	19	
8	400	685	1100	215	1,8	0,4	2335	2402	0,54	19	
	ЦЕМ І 52,5Н	Песок <b>карьерный</b> , Мк 2,3	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	360	860	1000	175	1,44	0,4	2389	2396	0,49	19	ЦЕМІ52,5Н+КГВП
2	385	840	1000	175	1,54	0,4	2394	2402	0,45	19	
3	410	810	1060	170	1,85	0,4	2444	2452	0,41	19	
4	430	780	1080	170	1,94	0,4	2455	2462	0,40	18	
5	440	780	1080	170	2,20	0,5	2465	2472	0,39	18	
6	445	760	1100	165	2,23	0,5	2465	2472	0,37	17	
7	450	740	1120	165	2,48	0,5	2470	2477	0,37	17	
8	460	730	1130	165	2,53	0,5	2480	2488	0,36	16	
9	480	720	1130	160	2,88	0,6	2485	2493	0,33	16	
	ЦЕМ І 52,5Н	Песок <b>речной</b> , Мк 1,6	Щебень <b>гранит</b> (смесь фракция 5-20 мм)	Вода	Добавка пластификатор: <b>поликарбоксилат</b>						
1	200	865	960	205	0,90	0,4	2168	2231	1,03	17	ЦЕМІ52,5Н+РГВП
2	220	865	960	205	0,99	0,4	2188	2251	0,93	18	
3	240	865	960	210	1,08	0,4	2212	2276	0,88	17	
4	260	815	1000	210	1,17	0,4	2222	2286	0,81	18	
5	290	805	1000	215	1,31	0,4	2247	2311	0,74	18	
6	320	775	1020	215	1,44	0,4	2266	2331	0,67	19	
7	340	765	1040	215	1,53	0,4	2295	2362	0,63	19	
8	390	755	1080	215	1,76	0,4	2373	2442	0,55	19	
9	420	735	1100	215	1,89	0,4	2403	2472	0,51	18	
10	450	715	1110	215	2,03	0,4	2422	2492	0,48	18	

Таблица 2. Физико-механические характеристики бетонов

Состав	№ №	Средняя прочность бетона (при сжатии), МПа									Растяжение при изгибе, Мпа	Осевое растяжение, Мпа	Водопоглощение, %				Водонепроницаемость	
		3 сутки			7 стуки			28 сутки					Масса образца, г	Масса образцов в насыщенном водой, г	Масса высушенных образцов, г	Водопогло- щение среднее для серии, %	Значение давления воды, Мпа	Марка бетона по водонепроницаемости, W
		m, кг	R, МПа	%	m, кг	R, МПа	%	m, кг	R, МПа	%								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ЦЕМ42,5Н+КИВН	1	2,180	3,6	38	2,189	6,2	65	2,194	8,0	83	0,56	0,52	2217	2271	1971	15,19	0	0
	2	2,200	4,1	32	2,209	8,2	64	2,214	11,0	86	0,77	0,72	2237	2290	1997	14,66	0	0
	3	2,220	5,8	36	2,229	10,9	68	2,234	15,2	95	1,06	0,99	2258	2310	2034	13,58	0,2	2
	4	2,240	7,9	41	2,250	12,7	66	2,254	18,0	94	1,26	1,17	2278	2321	2059	12,72	0,2	2
	5	2,261	9,2	36	2,270	16,9	66	2,274	22,5	88	1,80	1,46	2298	2337	2101	11,27	0,4	4
	6	2,281	11,2	39	2,290	19,9	69	2,295	27,6	96	2,21	1,80	2319	2358	2114	11,57	0,4	4
	7	2,321	13,4	42	2,330	23,0	72	2,335	31,4	98	2,51	2,04	2360	2400	2179	10,12	0,6	6
	8	2,381	15,0	39	2,391	27,3	71	2,396	38,0	99	3,01	2,45	2421	2455	2260	8,62	0,8	8
ЦЕМ42,5Н+РИВН	1	2,181	3,3	34	2,190	6,1	64	2,194	8,1	84	0,65	0,52	2219	2261	1973	14,62	0	0
	2	2,201	4,1	32	2,210	8,6	67	2,214	10,8	84	0,86	0,70	2239	2286	1991	14,85	0	0
	3	2,221	4,5	28	2,230	10,4	65	2,234	13,8	86	1,10	0,89	2259	2303	2027	13,59	0,2	2
	4	2,241	7,9	41	2,250	14,0	73	2,254	17,7	92	1,41	1,15	2281	2324	2062	12,72	0,2	2
	5	2,261	9,2	36	2,270	17,9	70	2,275	23,0	90	1,84	1,50	2301	2347	2105	11,48	0,4	4
	6	2,281	11,2	39	2,290	19,9	69	2,295	25,3	88	2,03	1,65	2321	2365	2138	10,64	0,4	4
	7	2,322	14,1	44	2,331	22,4	70	2,336	29,1	91	2,33	1,89	2362	2402	2187	9,83	0,6	6
	8	2,382	18,0	47	2,392	28,4	74	2,396	36,9	96	2,95	2,40	2423	2461	2264	8,67	0,8	8
ЦЕМ42,5Н+КГВН	1	2,180	4,6	48	2,189	6,8	71	2,193	9,4	98	0,75	0,61	2216	2265	1981	14,32	0	0
	2	2,200	5,8	45	2,209	9,9	77	2,213	12,9	101	1,03	0,84	2239	2284	1998	14,29	0	0
	3	2,225	7,8	49	2,234	12,0	75	2,238	15,2	95	1,22	0,99	2264	2307	2040	13,10	0,2	2
	4	2,235	9,2	48	2,244	14,0	73	2,249	19,6	102	1,57	1,27	2274	2318	2056	12,72	0,2	2
	5	2,260	11,0	43	2,269	17,7	69	2,274	24,8	97	1,99	1,61	2298	2340	2094	11,75	0,4	4
	6	2,281	13,2	46	2,290	20,4	71	2,294	28,2	98	2,26	1,83	2320	2360	2131	10,78	0,4	4
	7	2,315	15,7	49	2,325	21,4	67	2,329	30,4	95	2,43	1,98	2353	2393	2172	10,18	0,6	6
	8	2,396	19,2	50	2,405	26,9	70	2,410	38,4	100	3,07	2,50	2433	2472	2272	8,78	0,8	8
	9	2,431	18,8	42	2,440	33,2	74	2,445	43,5	97	3,48	2,82	2470	2500	2362	5,86	1,0	10
	10	2,461	24,1	47	2,471	37,9	74	2,476	52,7	103	4,22	3,43	2502	2525	2441	3,43	1,2	12
ЦЕМ42,5Н+РГВН	1	2,210	3,0	31,0	2,219	6,1	64	2,224	9,0	94	0,72	0,59	2248	2299	2014	14,16	0	0
	2	2,230	4,7	37,0	2,239	8,4	66	2,244	12,3	96	0,98	0,80	2268	2316	2026	14,33	0	0
	3	2,255	6,6	41,0	2,264	10,6	66	2,269	15,4	96	1,23	1,00	2294	2338	2070	12,97	0,2	2
	4	2,265	7,5	39,0	2,275	13,2	69	2,279	18,8	98	1,51	1,22	2302	2346	2085	12,48	0,2	2
	5	2,291	11,0	43,0	2,300	17,2	67	2,305	23,3	91	1,86	1,51	2329	2371	2126	11,50	0,4	4
	6	2,311	12,7	44,0	2,320	18,7	65	2,325	27,9	97	2,23	1,82	2349	2391	2168	10,29	0,4	4
	7	2,336	12,5	39,0	2,346	22,1	69	2,350	30,4	95	2,43	1,98	2373	2413	2200	9,71	0,6	6
	8	2,416	18,0	47,0	2,426	24,6	64	2,431	36,1	94	2,89	2,35	2453	2492	2296	8,55	0,8	8
	9	2,452	19,3	43,0	2,461	30,0	67	2,466	43,5	97	3,48	2,82	2488	2519	2394	5,20	1,0	10
	10	2,472	16,4	32,0	2,482	33,3	65	2,487	48,1	94	3,85	3,13	2511	2533	2448	3,49	1,2	12

## Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ЦЕМІ52,5Н+КІВН	1	2,180	3,9	41	2,189	6,2	65	2,193	8,8	92	0,71	0,57	2221	2275	1975	15,25	0	0
	2	2,200	5,8	45	2,209	8,8	69	2,214	12,3	96	0,98	0,80	2240	2293	1997	14,81	0	0
	3	2,220	6,7	42	2,229	10,4	65	2,234	15,0	94	1,20	0,98	2260	2309	2018	14,45	0	0
	4	2,240	8,1	42	2,249	12,7	66	2,254	18,2	95	1,46	1,19	2281	2327	2048	13,59	0,2	2
	5	2,260	12,0	47	2,270	16,6	65	2,274	24,6	96	1,97	1,60	2301	2345	2071	13,22	0,2	2
	6	2,281	13,0	45	2,290	19,6	68	2,294	27,1	94	2,17	1,76	2322	2366	2120	11,61	0,4	4
	7	2,321	14,7	46	2,330	21,1	66	2,335	30,7	96	2,46	2,00	2360	2401	2193	9,47	0,6	6
	8	2,380	16,5	43	2,390	25,7	67	2,395	37,6	98	3,01	2,45	2421	2461	2262	8,80	0,8	8
ЦЕМІ52,5Н+РІВН	1	2,181	4,1	43	2,189	6,1	64	2,194	8,7	91	0,70	0,57	2217	2271	1968	15,44	-	0
	2	2,201	5,1	40	2,210	8,3	65	2,214	12,4	97	0,99	0,81	2234	2287	1985	15,25	-	0
	3	2,221	6,9	43	2,230	10,2	64	2,234	15,2	95	1,22	0,99	2252	2308	2005	15,16	-	0
	4	2,241	8,1	42	2,250	13,2	69	2,254	17,9	93	1,43	1,16	2271	2319	2040	13,70	0,2	2
	5	2,261	10,2	40	2,270	16,6	65	2,275	24,6	96	1,97	1,60	2299	2345	2066	13,52	0,2	2
	6	2,281	13,2	46	2,290	19,3	67	2,295	27,4	95	2,19	1,78	2317	2363	2115	11,73	0,4	4
	7	2,321	15,0	47	2,331	21,8	68	2,336	29,8	93	2,38	1,93	2359	2399	2183	9,89	0,6	6
	8	2,382	16,9	44	2,391	25,7	67	2,396	36,5	95	2,92	2,37	2424	2463	2265	8,74	0,8	8
ЦЕМІ52,5Н+КІГВН	1	2,180	4,9	51	2,189	7,8	81	2,193	9,8	102	0,78	0,64	2214	2267	1974	14,80	-	0
	2	2,200	6,3	49	2,209	10,1	79	2,213	13,1	102	1,04	0,85	2235	2289	2003	14,29	-	0
	3	2,225	7,7	48	2,234	12,5	78	2,238	15,7	98	1,25	1,02	2257	2304	2032	13,39	0,2	2
	4	2,235	9,6	50	2,244	15,2	79	2,248	19,6	102	1,57	1,27	2274	2321	2051	13,15	0,2	2
	5	2,260	13,6	53	2,269	20,5	80	2,274	25,9	101	2,07	1,68	2297	2340	2096	11,64	0,4	4
	6	2,280	14,1	49	2,290	22,8	79	2,294	30,0	104	2,40	1,95	2311	2352	2112	11,38	0,4	4
	7	2,315	16,3	51	2,325	25,6	80	2,329	31,7	99	2,53	2,06	2357	2396	2180	9,88	0,6	6
	8	2,395	18,0	47	2,405	31,1	81	2,410	39,2	102	3,13	2,55	2433	2471	2274	8,66	0,8	8
	9	2,431	22,0	49	2,440	34,5	77	2,445	43,9	98	3,51	2,85	2469	2502	2386	4,86	1,0	10
	10	2,461	26,6	52	2,471	42,0	82	2,476	53,8	105	4,30	3,49	2496	2528	2444	3,44	1,2	12
ЦЕМІ52,5Н+РІГВН	1	2,210	4,5	47,0	2,219	6,6	69	2,224	9,0	94	0,72	0,59	2243	2299	1992	15,43	-	0
	2	2,230	6,3	49,0	2,239	9,1	71	2,244	12,5	98	1,00	0,82	2267	2322	2018	15,05	-	0
	3	2,255	8,0	50,0	2,264	11,5	72	2,269	15,8	99	1,27	1,03	2291	2338	2061	13,45	0,2	2
	4	2,265	8,4	44,0	2,275	13,2	69	2,279	18,4	96	1,47	1,20	2305	2353	2069	13,70	0,2	2
	5	2,291	12,0	47,0	2,300	17,9	70	2,304	24,8	97	1,99	1,61	2333	2379	2131	11,67	0,4	4
	6	2,311	14,1	49,0	2,320	19,0	66	2,325	27,6	96	2,21	1,80	2346	2393	2148	11,40	0,4	4
	7	2,336	15,7	49,0	2,345	20,8	65	2,350	30,4	95	2,43	1,98	2368	2408	2190	9,97	0,6	6
	8	2,416	17,7	46,0	2,426	26,1	68	2,431	37,2	97	2,98	2,42	2446	2487	2288	8,68	0,8	8
	9	2,451	22,4	50,0	2,461	32,7	73	2,466	44,4	99	3,55	2,88	2495	2529	2391	5,76	1,0	10
	10	2,472	26,1	51,0	2,482	36,9	72	2,487	50,7	99	4,06	3,29	2512	2545	2460	3,43	1,2	12
ЦЕМІ42,5Н+КІВП	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ЦЕМ42,5Н+РИВП	1	2,179	4,8	50	2,188	7,5	78	2,192	8,9	93	0,71	0,58	2218	2252	1975	14,03	-	0
	2	2,116	6,7	52	2,127	9,9	77	2,137	11,4	89	0,91	0,74	2233	2266	1985	14,16	-	0
	3	2,135	8,8	55	2,146	12,0	75	2,157	14,6	91	1,16	0,95	2256	2291	2008	14,09	-	0
	4	2,154	10,2	53	2,165	14,6	76	2,176	17,3	90	1,38	1,12	2283	2321	2059	12,74	0,2	2
	5	2,173	13,6	53	2,184	19,2	75	2,195	22,3	87	1,78	1,45	2300	2337	2080	12,36	0,2	2
	6	2,192	15,0	52	2,204	21,3	74	2,215	25,3	88	2,03	1,65	2326	2364	2135	10,74	0,4	4
	7	2,231	17,6	55	2,242	24,3	76	2,253	27,8	87	2,23	1,81	2357	2394	2186	9,53	0,6	6
	8	2,288	20,7	54	2,300	28,8	75	2,312	32,3	84	2,58	2,10	2419	2455	2303	6,61	0,8	8
ЦЕМ42,5Н+КТВП	1	2,342	25,3	66	2,354	36,9	96	2,366	42,2	110	3,38	2,75	2414	2452	2303	6,50	0,8	8
	2	2,347	29,1	65	2,359	42,6	95	2,371	47,0	105	3,76	3,06	2422	2453	2358	4,06	1,0	10
	3	2,396	32,3	63	2,408	48,1	94	2,420	55,3	108	4,42	3,59	2473	2503	2425	3,20	1,2	12
	4	2,406	37,4	65	2,418	53,6	93	2,430	62,8	109	5,02	4,08	2484	2511	2441	2,88	1,4	14
	5	2,416	41,0	64	2,428	58,9	92	2,440	64,6	101	5,17	4,20	2490	2515	2460	2,24	1,6	16
	6	2,416	43,6	62	2,428	65,5	93	2,440	71,8	102	5,74	4,67	2491	2514	2474	1,60	1,8	18
	7	2,421	45,3	59	2,433	69,1	90	2,446	79,9	104	6,39	5,19	2493	2510	2486	0,98	2,0	20
	8	2,431	49,9	60	2,443	75,7	91	2,455	84,0	101	6,72	5,46	2504	2516	2492	0,97	2,0	20
	9	2,436	54,7	61	2,449	80,6	90	2,461	91,4	102	7,31	5,94	2512	2522	2498	0,97	2,0	20
ЦЕМ42,5Н+РТВП	1	2,125	5,4	56	2,136	8,1	84	2,147	9,1	95	0,73	0,59	2248	2286	2004	14,10	-	0
	2	2,144	7,0	55	2,155	10,8	84	2,166	11,9	93	0,95	0,77	2270	2307	2021	14,14	-	0
	3	2,168	9,0	56	2,179	13,6	85	2,190	14,7	92	1,18	0,96	2298	2335	2073	12,65	0,2	2
	4	2,178	11,1	58	2,189	15,9	83	2,200	18,0	94	1,44	1,17	2307	2344	2085	12,41	0,2	2
	5	2,202	14,6	57	2,213	22,0	86	2,224	23,3	91	1,86	1,51	2334	2372	2139	10,89	0,4	4
	6	2,221	16,1	56	2,232	24,5	85	2,244	25,9	90	2,07	1,68	2346	2383	2151	10,78	0,4	4
	7	2,250	17,6	55	2,261	27,5	86	2,273	30,7	96	2,46	2,00	2378	2413	2201	9,67	0,6	6
	8	2,326	21,5	56	2,338	33,4	87	2,350	35,7	93	2,86	2,32	2462	2499	2339	6,84	0,8	8
	9	2,355	25,5	57	2,367	38,1	85	2,379	42,6	95	3,40	2,77	2496	2528	2424	4,28	1,0	10
	10	2,374	30,2	59	2,387	43,0	84	2,399	48,1	94	3,85	3,13	2515	2545	2460	3,43	1,2	12
ЦЕМ52,5Н+КИВП	1	2,097	7,8	61	2,107	10,9	85	2,118	12,3	96	0,98	0,80	2222	2275	1993	14,16	-	0
	2	2,116	9,6	60	2,126	13,1	82	2,137	15,7	98	1,25	1,02	2239	2288	2005	14,13	-	0
	3	2,135	11,1	58	2,146	16,5	86	2,157	18,8	98	1,51	1,22	2260	2303	2043	12,74	0,2	2
	4	2,154	15,1	59	2,165	21,5	84	2,176	24,6	96	1,97	1,60	2281	2322	2067	12,36	0,2	2
	5	2,173	16,1	56	2,184	24,5	85	2,195	27,9	97	2,23	1,82	2302	2339	2109	10,93	0,6	4
	6	2,192	17,6	55	2,203	27,5	86	2,215	30,4	95	2,43	1,98	2324	2359	2149	9,81	0,6	6
	7	2,231	22,7	59	2,242	33,4	87	2,253	36,9	96	2,95	2,40	2361	2394	2233	7,18	0,8	8
	8	2,288	24,6	55	2,300	37,6	84	2,311	43,9	98	3,48	2,82	2419	2450	2345	4,49	1,0	10
ЦЕМ52,5Н+РИВП	1	2,097	7,3	57	2,107	11,6	91	2,118	13,1	102	1,04	0,85	2220	2273	1988	14,36	-	0
	2	2,116	8,8	55	2,126	13,8	86	2,137	15,8	99	1,27	1,03	2237	2286	2000	14,31	-	0
	3	2,135	10,6	55	2,146	17,1	89	2,157	19,4	101	1,55	1,26	2262	2305	2035	13,25	0,2	2
	4	2,154	15,6	61	2,165	21,8	85	2,176	26,4	103	2,11	1,71	2285	2326	2057	13,08	0,2	2
	5	2,173	16,1	56	2,184	24,8	86	2,195	27,9	97	2,23	1,82	2301	2338	2109	10,84	0,6	4
	6	2,192	19,2	60	2,203	28,2	88	2,215	31,4	98	2,51	2,04	2315	2350	2137	9,97	0,6	6
	7	2,231	21,1	55	2,242	32,6	85	2,253	38,8	101	3,10	2,52	2364	2397	2228	7,58	0,8	8
	8	2,288	25,1	56	2,300	38,5	86	2,311	43,5	97	3,48	2,82	2420	2451	2334	5,04	1,0	10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ЦЕМІ52,5Н+КГВП	1	2,341	26,1	68	2,353	36,9	96	2,365	43,4	113	3,47	2,82	2414	2453	2306	6,38	0,8	8
	2	2,346	30,5	68	2,358	43,5	97	2,370	48,8	109	3,91	3,17	2421	2452	2361	3,84	1,0	10
	3	2,396	33,8	66	2,408	50,2	98	2,420	56,8	111	4,55	3,69	2470	2499	2424	3,09	1,2	12
	4	2,405	38,6	67	2,418	55,3	96	2,430	63,4	110	5,07	4,12	2480	2507	2438	2,82	1,4	14
	5	2,415	41,6	65	2,428	60,8	95	2,440	68,5	107	5,48	4,45	2493	2518	2466	2,10	1,6	16
	6	2,416	45,8	65	2,428	67,6	96	2,440	76,0	108	6,08	4,94	2494	2517	2481	1,44	1,8	18
	7	2,421	48,4	63	2,433	69,9	91	2,445	84,5	110	7,60	5,49	2500	2518	2497	0,85	2,0	20
	8	2,430	49,9	60	2,443	74,9	90	2,455	89,0	107	7,12	5,79	2508	2520	2500	0,82	2,0	20
	9	2,436	55,6	62	2,448	83,3	93	2,461	94,1	105	7,53	6,12	2511	2521	2501	0,79	2,0	20
ЦЕМІ52,5Н+РГВП	1	2,125	5,6	58	2,136	8,2	85	2,147	10,1	105	0,81	0,66	2252	2308	2023	14,08	-	0
	2	2,144	7,7	60	2,155	11,0	86	2,166	13,8	108	1,11	0,90	2270	2325	2038	14,06	-	0
	3	2,168	10,1	63	2,179	13,6	85	2,190	16,6	104	1,33	1,08	2296	2342	2079	12,67	0,2	2
	4	2,178	11,7	61	2,189	16,7	87	2,200	20,4	106	1,63	1,32	2308	2354	2091	12,55	0,2	2
	5	2,202	15,9	62	2,213	21,5	84	2,224	26,9	105	2,15	1,75	2334	2381	2148	10,86	0,4	4
	6	2,221	17,3	60	2,232	24,5	85	2,243	29,1	101	2,33	1,89	2350	2397	2165	10,75	0,4	4
	7	2,249	19,2	60	2,261	26,9	84	2,272	33,0	103	2,64	2,14	2381	2421	2203	9,91	0,6	6
	8	2,326	23,0	60	2,338	31,5	82	2,350	39,2	102	3,13	2,55	2463	2503	2319	7,93	0,8	8
	9	2,355	26,4	59	2,367	36,3	81	2,379	46,1	103	3,69	3,00	2491	2525	2407	4,86	1,0	10
	10	2,374	29,7	58	2,386	42,0	82	2,398	51,7	101	4,65	3,36	2512	2545	2467	3,16	1,2	12

Таблица 3. Физико-механические характеристики бетонов.

Состав	№ №	Морозостойкость													Класс бетона по прочности
		Прочность бетона, МПа										Масса образцов (средняя), г		Марка по морозостойкости, F	
		Контрольных образцов					Основных образцов					Основных до замараживания и оттаивания	Основных после замараживания и оттаивания		
		XcpI, МПа	σnI, МПа	V, %	XminI, МПа	0,9XminI, МПа	XcpII, МПа	σnII, МПа	V, %	XminII, МПа	Δm, %				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ЦЕМ42,5Н+КИВН	1	7,8	0,63	8,04	6,2	5,6	7,5	0,67	9,05	5,7	1,03	2227	2204	-	7,5
	2	10,8	0,88	8,12	8,6	7,7	10,3	0,89	8,67	8,0	0,98	2243	2221	-	10
	3	15,0	1,17	7,80	12,0	10,8	14,2	1,16	8,17	11,2	0,88	2271	2251	-	12,5
	4	17,8	1,18	6,63	14,7	13,3	16,9	1,32	7,79	13,5	1,01	2281	2258	50	15
	5	22,2	0,91	4,12	19,8	17,9	21,1	1,60	7,58	17,0	1,17	2307	2280	50	20
	6	27,2	1,14	4,18	24,3	21,9	25,9	1,74	6,74	21,4	1,07	2330	2305	100	22,5
	7	30,9	1,32	4,27	27,5	24,7	29,3	1,85	6,32	24,6	1,10	2367	2341	150	25
	8	37,1	1,50	4,04	33,2	29,9	35,2	2,08	5,89	29,9	0,94	2435	2412	150	30
ЦЕМ42,5Н+РИВН	1	7,9	0,63	7,96	6,3	5,7	7,5	0,67	8,84	5,8	1,17	2224	2198	-	7,5
	2	10,6	0,85	8,02	8,4	7,6	10,1	0,85	8,42	7,9	1,20	2251	2224	-	10
	3	13,6	1,14	8,44	10,6	9,6	12,9	1,03	8,00	10,2	1,08	2271	2246	-	12,5
	4	17,4	1,12	6,44	14,5	13,1	16,5	1,25	7,58	13,3	1,01	2288	2265	50	15
	5	22,7	1,37	6,04	19,2	17,3	21,6	1,53	7,12	17,6	1,00	2305	2282	50	20
	6	25,0	1,41	5,64	21,3	19,2	23,7	1,58	6,65	19,7	1,20	2330	2302	100	22,5
	7	28,7	1,50	5,24	24,8	22,3	27,2	1,70	6,23	22,9	1,10	2373	2347	150	25
	8	36,3	1,76	4,84	31,8	28,6	34,5	2,02	5,85	29,3	0,99	2429	2405	150	30

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ЦЕМ42,5Н+КТВН	1	9,3	0,81	8,76	7,2	6,5	8,8	0,77	8,76	6,8	1,35	2222	2192	-	7,5
	2	12,7	1,08	8,46	10,0	9,0	12,1	1,01	8,34	9,5	1,25	2248	2220	-	10
	3	15,0	1,28	8,52	11,7	10,5	14,2	1,13	7,92	11,3	1,23	2276	2248	50	12,5
	4	19,3	1,27	6,56	16,0	14,4	18,3	1,37	7,49	14,8	1,10	2282	2257	50	15
	5	24,5	1,50	6,12	20,6	18,6	23,2	1,63	7,03	19,0	1,12	2311	2285	100	20
	6	27,8	1,59	5,72	23,7	21,3	26,4	1,73	6,57	22,0	1,29	2325	2295	100	22,5
	7	29,9	1,58	5,28	25,9	23,3	28,4	1,75	6,15	24,0	1,40	2365	2332	150	25
	8	37,8	1,97	5,20	32,8	29,5	35,9	2,07	5,77	30,6	1,15	2441	2413	200	30
	9	42,8	1,78	4,16	38,2	34,4	40,7	2,21	5,43	35,0	1,01	2479	2454	200	35
	10	51,9	2,51	4,84	45,5	40,9	49,3	2,47	5,01	43,0	1,08	2505	2478	300	40
ЦЕМ42,5Н+РГВН	1	8,9	0,74	8,36	7,0	6,3	8,4	0,73	8,67	6,6	1,15	2262	2236	-	7,5
	2	12,1	0,98	8,06	9,6	8,6	11,5	0,95	8,25	9,1	1,36	2277	2246	-	10
	3	15,1	1,23	8,12	12,0	10,8	14,4	1,13	7,83	11,5	1,17	2301	2274	50	12,5
	4	18,5	1,14	6,16	15,6	14,0	17,6	1,30	7,41	14,3	1,08	2305	2280	50	15
	5	22,9	1,31	5,72	19,6	17,6	21,8	1,51	6,95	17,9	1,32	2340	2309	100	20
	6	27,5	1,46	5,32	23,8	21,4	26,1	1,70	6,48	21,8	1,19	2358	2330	100	22,5
	7	29,9	1,46	4,88	26,2	23,6	28,4	1,72	6,06	24,0	1,05	2378	2353	150	25
	8	35,6	1,78	5,00	31,0	27,9	33,8	1,92	5,68	28,8	1,18	2466	2437	200	30
	9	42,8	2,04	4,76	37,6	33,8	40,7	2,17	5,35	35,1	1,20	2499	2469	200	35
	10	47,4	2,28	4,80	41,6	37,4	45,0	2,22	4,93	39,3	0,95	2517	2493	300	40
ЦЕМ52,5Н+КВН	1	8,7	0,70	8,02	6,9	6,2	8,3	0,73	8,82	6,4	1,26	2223	2195	-	7,5
	2	12,1	0,96	7,92	9,6	8,7	11,5	0,97	8,40	9,0	1,33	2248	2218	-	10
	3	14,8	1,13	7,60	11,9	10,7	14,1	1,12	7,94	11,2	1,41	2265	2233	-	12,5
	4	18,0	1,16	6,43	15,0	13,5	17,1	1,29	7,56	13,8	1,18	2288	2261	50	15
	5	24,2	0,95	3,92	21,8	19,6	23,0	1,69	7,35	18,7	1,12	2315	2289	100	20
	6	26,7	1,06	3,98	23,9	21,5	25,3	1,65	6,51	21,1	1,07	2331	2306	100	22,5
	7	30,3	1,23	4,07	27,1	24,4	28,7	1,75	6,08	24,3	0,97	2366	2343	150	25
	8	37,1	1,42	3,84	33,4	30,1	35,2	1,99	5,66	30,1	1,19	2432	2403	200	30
ЦЕМ52,5Н+РВН	1	8,6	0,67	7,76	6,9	6,2	8,2	0,70	8,61	6,4	1,48	2224	2191	-	7,5
	2	12,2	0,96	7,82	9,8	8,8	11,6	0,95	8,19	9,2	1,11	2249	2224	-	10
	3	15,0	1,17	7,84	12,0	10,8	14,2	1,10	7,77	11,4	1,15	2264	2238	-	12,5
	4	17,6	1,10	6,24	14,8	13,3	16,7	1,23	7,35	13,6	1,23	2277	2249	50	15
	5	24,2	1,41	5,84	20,6	18,5	23,0	1,58	6,88	18,9	0,95	2310	2288	100	20
	6	26,9	1,47	5,44	23,2	20,9	25,6	1,64	6,42	21,4	1,16	2320	2293	100	22,5
	7	29,3	1,48	5,04	25,5	23,0	27,8	1,67	6,00	23,6	1,10	2366	2340	150	25
	8	35,9	1,67	4,64	31,6	28,5	34,1	1,92	5,62	29,2	0,99	2436	2412	200	30
ЦЕМ52,5Н+КТВН	1	9,6	0,83	8,56	7,5	6,8	9,2	0,78	8,53	7,2	1,08	2220	2196	-	7,5
	2	12,9	1,06	8,26	10,1	9,1	12,2	0,99	8,11	9,7	1,20	2244	2217	-	10
	3	15,4	1,29	8,32	12,1	10,9	14,7	1,13	7,68	11,8	1,32	2271	2241	50	12,5
	4	19,3	1,23	6,36	16,1	14,5	18,3	1,33	7,26	14,9	1,23	2282	2254	50	15
	5	25,5	1,51	5,92	21,6	19,4	24,2	1,65	6,80	20,0	1,26	2301	2272	100	20
	6	29,5	1,63	5,52	25,3	22,8	28,0	1,78	6,34	23,5	1,42	2324	2291	100	22,5
	7	31,2	1,59	5,08	27,1	24,4	29,6	1,75	5,92	25,1	1,27	2366	2336	150	25
	8	38,6	1,93	5,00	33,6	30,3	36,7	2,03	5,54	31,4	1,03	2435	2410	200	30



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	9	43,2	2,18	5,04	37,6	33,9	41,1	2,14	5,20	35,6	1,13	2476	2448	200	35
	10	53,0	2,69	5,08	46,0	41,4	50,3	2,40	4,78	44,1	1,12	2505	2477	300	40
ЦЕМІ52,5Н+РГВН	1	8,9	0,73	8,16	7,0	6,3	8,4	0,71	8,44	6,6	1,33	2251	2221	-	7,5
	2	12,4	0,97	7,86	9,9	8,9	11,7	0,94	8,02	9,3	1,18	2280	2253	-	10
	3	15,6	1,24	7,92	12,4	11,2	14,8	1,13	7,60	11,9	1,26	2305	2276	50	12,5
	4	18,2	1,08	5,96	15,4	13,8	17,2	1,24	7,18	14,1	1,08	2315	2290	50	15
	5	24,5	1,35	5,52	21,0	18,9	23,2	1,56	6,72	19,2	1,32	2342	2311	100	20
	6	27,2	1,39	5,12	23,6	21,3	25,9	1,62	6,25	21,7	0,89	2358	2337	100	22,5
	7	29,9	2,12	7,08	24,5	22,0	28,4	1,66	5,83	24,2	0,76	2374	2356	150	25
	8	36,7	1,76	4,80	32,2	28,9	34,9	1,89	5,41	30,0	1,26	2462	2431	200	30
	9	43,7	2,06	4,72	38,4	34,5	41,5	2,12	5,12	36,0	0,96	2502	2478	200	35
	10	49,9	2,30	4,60	44,0	39,6	47,4	2,23	4,69	41,7	1,07	2515	2488	300	40
ЦЕМІ42,5Н+КИВП	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЦЕМІ42,5Н+РИВП	1	8,8	0,61	6,93	7,2	6,5	8,4	0,66	7,86	6,7	0,36	2223,1	2215,1	-	7,5
	2	11,2	0,62	5,49	9,6	8,7	10,7	0,79	7,44	8,6	0,40	2245,2	2236,2	-	10
	3	14,3	0,76	5,33	12,4	11,1	13,6	0,90	6,60	11,3	0,09	2268,3	2266,3	-	12,5
	4	17,0	0,87	5,09	14,8	13,3	16,2	1,00	6,18	13,6	0,48	2290,4	2279,4	50	15
	5	21,9	1,04	4,75	19,3	17,3	20,8	1,20	5,76	17,8	0,13	2304,5	2301,5	50	20
	6	25,0	1,09	4,35	22,2	20,0	23,7	1,35	5,71	20,2	0,30	2334,6	2327,6	100	22,5
	7	27,4	1,10	4,01	24,6	22,1	26,1	1,45	5,57	22,3	0,55	2367,8	2354,8	150	25
	8	31,8	1,24	3,89	28,6	25,7	30,2	1,65	5,48	25,9	0,21	2425,4	2420,4	150	30
ЦЕМІ42,5Н+КГВП	1	41,6	2,72	6,54	34,6	31,1	39,5	2,94	7,44	32,0	0,17	2419,6	2415,6	200	30
	2	46,3	2,36	5,10	40,3	36,2	44,0	3,09	7,02	36,1	0,41	2430,7	2420,7	200	35
	3	54,5	2,69	4,94	47,5	42,8	51,7	3,20	6,18	43,5	0,28	2485,1	2478,1	300	40
	4	61,8	2,91	4,70	54,4	48,9	58,8	3,38	5,76	50,1	0,08	2492,2	2490,2	300	45
	5	63,7	2,78	4,36	56,5	50,9	60,5	3,23	5,33	52,2	0,44	2503,4	2492,4	400	50
	6	70,7	2,80	3,96	63,5	57,2	67,2	3,55	5,29	58,1	0,32	2496,4	2488,4	500	55
	7	78,7	2,85	3,62	71,3	64,2	74,7	3,85	5,15	64,8	0,40	2504,7	2494,7	500	60
	8	82,8	2,90	3,50	75,3	67,8	78,6	3,90	4,96	68,6	0,16	2511,8	2507,8	500	65
	9	90,0	3,12	3,47	82,0	73,8	85,5	3,92	4,59	75,4	0,28	2521,4	2514,4	600	70
ЦЕМІ42,5Н+РГВ	1	9,0	0,60	6,62	7,5	6,7	8,5	0,64	7,52	6,9	0,40	2262,0	2253,0	-	7,5
	2	11,7	0,61	5,18	10,2	9,1	11,1	0,79	7,10	9,1	0,13	2279,1	2276,1	-	10
	3	14,5	0,73	5,02	12,6	11,4	13,8	0,86	6,26	11,6	0,30	2305,2	2298,2	-	12,5
	4	17,8	0,85	4,78	15,6	14,0	16,9	0,99	5,84	14,4	0,22	2310,3	2305,3	50	15
	5	22,9	1,02	4,44	20,3	18,3	21,8	1,18	5,42	18,8	0,47	2345,5	2334,5	100	20
	6	25,5	1,03	4,04	22,9	20,6	24,3	1,30	5,37	20,9	0,30	2354,6	2347,6	100	22,5
	7	30,3	1,12	3,70	27,4	24,6	28,7	1,50	5,23	24,9	0,21	2382,7	2377,7	150	25

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ЦЕМІ52,5Н+КІВП	8	35,2	1,23	3,50	32,0	28,8	33,4	1,69	5,04	29,1	0,53	2475,3	2462,3	200	30
	9	41,9	1,70	4,06	37,6	33,8	39,8	1,86	4,67	35,0	0,44	2506,5	2495,5	200	35
	10	47,4	1,79	3,77	42,8	38,5	45,0	2,07	4,59	39,7	0,36	2520,7	2511,7	300	40
	1	12,1	0,87	7,17	9,9	8,9	11,5	0,86	7,47	9,3	0,36	2223,9	2215,9	-	10
	2	15,4	0,86	5,57	13,2	11,9	14,7	1,03	7,04	12,0	0,45	2247,0	2237,0	-	12,5
	3	18,5	1,03	5,57	15,9	14,3	17,6	1,09	6,20	14,8	0,53	2265,1	2253,1	-	15
	4	24,2	1,25	5,17	21,0	18,9	23,0	1,33	5,78	19,6	0,31	2288,2	2281,2	50	20
	5	27,5	1,31	4,77	24,1	21,7	26,1	1,40	5,36	22,5	0,26	2316,3	2310,3	50	22,5
	6	29,9	1,31	4,37	26,6	23,9	28,4	1,53	5,39	24,5	0,21	2333,4	2328,4	100	25
	7	36,3	1,59	4,37	32,2	29,0	34,5	1,85	5,36	29,7	0,55	2366,6	2353,6	150	30
ЦЕМІ52,5Н+РІВП	8	42,8	1,70	3,97	38,4	34,6	40,4	2,13	5,27	35,0	0,37	2429,8	2420,8	150	35
	1	12,9	0,90	6,97	10,6	9,5	12,2	0,94	7,71	9,8	0,13	2226,9	2223,9	-	10
	2	15,6	0,84	5,37	13,4	12,1	14,8	1,08	7,29	12,0	0,22	2252,0	2247,0	-	12,5
	3	19,1	1,03	5,37	16,5	14,8	18,1	1,17	6,45	15,1	0,26	2274,1	2268,1	-	15
	4	26,0	1,29	4,97	22,7	20,4	24,7	1,49	6,03	20,9	0,35	2291,2	2283,2	50	20
	5	27,5	1,26	4,57	24,3	21,9	26,1	1,47	5,61	22,4	0,30	2312,3	2305,3	50	22,5
	6	30,9	1,29	4,17	27,6	24,8	29,3	1,64	5,60	25,1	0,43	2318,4	2308,4	100	25
	7	38,2	1,59	4,17	34,1	30,7	36,3	1,94	5,34	31,3	0,55	2370,6	2357,6	150	30
ЦЕМІ52,5Н+КГВП	8	42,8	1,61	3,77	38,7	34,8	40,7	2,13	5,25	35,2	0,37	2431,8	2422,8	150	35
	1	42,7	2,63	6,14	36,0	32,4	40,6	2,88	7,10	33,2	0,17	2420,4	2416,4	300	30
	2	48,1	2,26	4,70	42,3	38,1	45,7	3,05	6,68	37,8	0,29	2429,5	2422,5	300	35
	3	56,0	2,54	4,54	49,4	44,5	53,2	3,11	5,84	45,2	0,40	2483,8	2473,8	300	40
	4	62,4	2,69	4,30	55,5	50,0	59,3	3,21	5,42	51,0	0,32	2487,9	2479,9	400	45
	5	67,5	2,68	3,97	60,6	54,5	64,1	3,20	5,00	55,8	0,36	2497,2	2488,2	400	50
	6	74,9	2,67	3,56	68,0	61,2	71,1	3,52	4,95	62,1	0,52	2507,2	2494,2	500	55
	7	83,2	2,68	3,22	76,3	68,7	79,1	3,80	4,81	69,3	0,40	2509,5	2499,5	500	60
	8	87,7	2,72	3,10	80,7	72,6	83,3	3,85	4,62	73,4	0,20	2509,5	2504,5	500	65
ЦЕМІ52,5Н+РГВП	9	92,7	2,55	2,76	86,1	77,5	88,0	3,74	4,25	78,4	0,32	2517,9	2509,9	600	70
	1	9,9	0,63	6,34	8,3	7,5	9,4	0,69	7,26	7,7	0,44	2259,9	2249,9	-	7,5
	2	13,6	0,67	4,90	11,9	10,7	12,9	0,89	6,84	10,7	0,31	2283,0	2276,0	-	10
	3	16,4	0,78	4,74	14,4	13,0	15,6	0,93	6,00	13,2	0,39	2310,1	2301,1	50	12,5
	4	20,0	0,90	4,50	17,7	16,0	19,0	1,06	5,58	16,3	0,22	2318,2	2313,2	50	15
	5	26,5	1,09	4,12	23,7	21,3	25,2	1,34	5,33	21,7	0,47	2343,3	2332,3	100	20
	6	28,7	1,07	3,72	25,9	23,3	27,2	1,43	5,24	23,6	0,47	2362,4	2351,4	100	22,5
	7	32,5	1,11	3,42	29,6	26,6	30,8	1,56	5,05	26,8	0,34	2386,5	2378,5	150	25
	8	38,6	1,24	3,22	35,4	31,8	36,7	1,74	4,74	32,2	0,44	2478,8	2467,8	200	30
	9	45,5	1,21	2,66	42,3	38,1	43,2	1,86	4,32	38,4	0,56	2497,9	2483,9	200	35
	10	50,9	1,22	2,40	47,8	43,0	48,4	2,08	4,29	43,1	0,28	2515,0	2508,0	300	40

Таблица 4. Физические характеристики бетонов. Количество сульфатов, поглощённых растворной частью бетона  $\Sigma P_{SO_3}$ , % от массы цемента (в условиях полного погружения образцов в среде с постоянной концентрацией)

Состав	№№	Продолжительность исследования, месяцы							
		3		6		9		12	
		Концентрация раствора Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , по иону SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л							
		500	5000	500	5000	500	5000	500	5000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦЕМ42,5Н+КИВН	1	-	-	2,41	11,05	2,92	11,31	3,68	11,5
	2	-	-	1,76	8,04	2,12	8,22	2,68	8,36
	3	-	-	1,27	5,82	1,54	5,95	1,94	6,05
	4	-	-	1,07	4,91	1,3	5,02	1,64	5,11
	5	-	-	0,86	3,93	1,04	4,02	1,31	4,09
	6	-	-	0,7	3,2	0,85	3,28	1,07	3,33
	7	-	-	0,61	2,82	0,74	2,88	0,94	2,93
	8	-	-	0,51	2,35	0,62	2,41	0,78	2,45
ЦЕМ42,5Н+РИВН	1	-	-	2,24	10,25	2,71	10,49	3,42	10,67
	2	-	-	1,68	7,69	2,03	7,87	2,56	8
	3	-	-	1,31	6,02	1,59	6,16	2,01	6,26
	4	-	-	1,02	4,69	1,24	4,8	1,56	4,88
	5	-	-	0,79	3,61	0,95	3,69	1,2	3,76
	6	-	-	0,72	3,28	0,87	3,36	1,09	3,41
	7	-	-	0,62	2,85	0,75	2,92	0,95	2,97
	8	-	-	0,49	2,25	0,6	2,3	0,75	2,34
ЦЕМ42,5Н+КГВН	1	-	-	1,88	8,62	2,28	8,82	2,87	8,97
	2	-	-	1,37	6,28	1,66	6,43	2,09	6,53
	3	-	-	1,16	5,33	1,41	5,45	1,78	5,55
	4	-	-	0,9	4,13	1,09	4,23	1,38	4,3
	5	-	-	0,71	3,27	0,86	3,34	1,09	3,4
	6	-	-	0,63	2,87	0,76	2,94	0,96	2,99
	7	-	-	0,58	2,67	0,7	2,73	0,89	2,77
	8	-	-	0,46	2,11	0,56	2,16	0,7	2,2
	9	-	-	0,41	1,86	0,49	1,91	0,62	1,94
	10	-	-	0,3	1,54	0,41	1,57	0,51	1,6
ЦЕМ42,5Н+РГВН	1	-	-	1,62	7,4	1,96	7,57	2,47	7,7
	2	-	-	1,4	6,43	1,7	6,58	2,14	6,69
	3	-	-	1,12	5,14	1,36	5,25	1,71	5,34
	4	-	-	0,92	4,21	1,11	4,3	1,4	4,38
	5	-	-	0,74	3,39	0,9	3,47	1,13	3,53
	6	-	-	0,62	2,83	0,75	2,9	0,94	2,95
	7	-	-	0,57	2,6	0,69	2,66	0,87	2,71
	8	-	-	0,48	2,19	0,58	2,24	0,73	2,28
	9	-	-	0,4	1,82	0,48	1,86	0,61	1,89

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦЕМІ52,5Н+КИВН	10	-	-	0,3	1,64	0,43	1,68	0,55	1,71
	1	-	-	1,68	7,71	2,04	7,89	2,57	8,02
	2	-	-	1,48	6,76	1,79	6,91	2,25	7,03
	3	-	-	1,21	5,54	1,46	5,67	1,85	5,76
	4	-	-	1	4,57	1,21	4,67	1,52	4,75
	5	-	-	0,74	3,38	0,89	3,46	1,13	3,51
	6	-	-	0,67	3,07	0,81	3,14	1,02	3,19
	7	-	-	0,59	2,71	0,72	2,77	0,9	2,82
	8	-	-	0,48	2,21	0,58	2,26	0,74	2,3
ЦЕМІ52,5Н+РИВН	1	-	-	1,63	7,47	1,98	7,65	2,49	7,77
	2	-	-	1,40	6,42	1,70	6,57	2,14	6,68
	3	-	-	1,14	5,24	1,39	5,36	1,75	5,45
	4	-	-	0,97	4,45	1,18	4,55	1,48	4,63
	5	-	-	0,71	3,24	0,86	3,31	1,08	3,37
	6	-	-	0,63	2,91	0,77	2,97	0,97	3,02
	7	-	-	0,58	2,67	0,71	2,73	0,89	2,78
	8	-	-	0,48	2,18	0,58	2,23	0,73	2,27
ЦЕМІ52,5Н+КГВН	1	-	-	1,39	6,38	1,69	6,52	2,13	6,63
	2	-	-	1,29	5,90	1,56	6,03	1,97	6,14
	3	-	-	1,07	4,92	1,30	5,04	1,64	5,12
	4	-	-	0,86	3,94	1,04	4,03	1,31	4,10
	5	-	-	0,65	2,98	0,79	3,05	0,99	3,10
	6	-	-	0,56	2,58	0,68	2,64	0,86	2,68
	7	-	-	0,53	2,44	0,64	2,49	0,81	2,54
	8	-	-	0,43	1,97	0,52	2,02	0,66	2,05
	9	-	-	0,38	1,76	0,47	1,80	0,59	1,83
	10	-	-	0,28	1,44	0,38	1,47	0,48	1,49
ЦЕМІ52,5Н+РГВН	1	-	-	1,48	6,79	1,79	6,94	2,26	7,06
	2	-	-	1,31	5,98	1,58	6,12	1,99	6,22
	3	-	-	1,03	4,73	1,25	4,84	1,58	4,92
	4	-	-	0,89	4,06	1,07	4,16	1,35	4,23
	5	-	-	0,66	3,01	0,80	3,08	1,00	3,14
	6	-	-	0,59	2,71	0,72	2,77	0,90	2,82
	7	-	-	0,54	2,46	0,65	2,52	0,82	2,56
	8	-	-	0,44	2,01	0,53	2,06	0,67	2,09
	9	-	-	0,37	1,68	0,45	1,72	0,56	1,75
	10	-	-	0,27	1,47	0,39	1,51	0,49	1,53

Продолжение таблицы 4

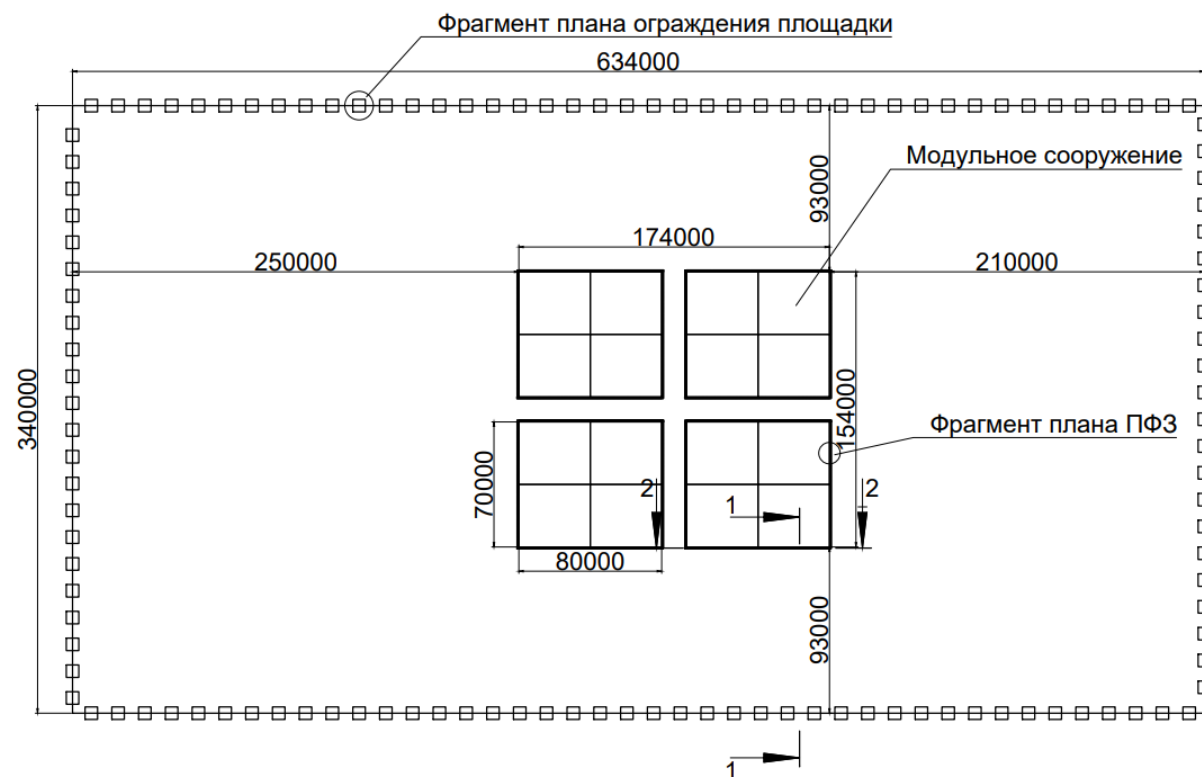
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦЕМІ42,5Н+КІВП	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЦЕМІ42,5Н+РІВП	1	-	-	1,41	6,45	1,70	6,60	2,15	6,71
	2	-	-	1,28	5,85	1,55	5,98	1,95	6,08
	3	-	-	1,00	4,57	1,21	4,67	1,52	4,75
	4	-	-	0,84	3,85	1,02	3,94	1,28	4,01
	5	-	-	0,65	2,99	0,79	3,06	1,00	3,11
	6	-	-	0,58	2,64	0,70	2,70	0,88	2,74
	7	-	-	0,52	2,40	0,63	2,45	0,80	2,50
	8	-	-	0,45	2,06	0,55	2,11	0,69	2,15
ЦЕМІ42,5Н+КГВП	1	-	-	0,37	1,79	0,44	1,81	0,58	1,83
	2	-	-	0,35	1,71	0,42	1,73	0,55	1,75
	3	-	-	0,34	1,65	0,41	1,67	0,53	1,69
	4	-	-	0,33	1,59	0,39	1,61	0,51	1,62
	5	-	-	0,32	1,54	0,38	1,56	0,50	1,58
	6	-	-	0,31	1,51	0,37	1,52	0,49	1,54
	7	-	-	0,29	1,45	0,34	1,47	0,47	1,49
	8	-	-	0,29	1,40	0,34	1,42	0,45	1,43
	9	-	-	0,28	1,36	0,33	1,37	0,44	1,39
ЦЕМІ42,5Н+РГВП	1	-	-	1,43	6,55	1,73	6,70	2,18	6,82
	2	-	-	1,27	5,83	1,54	5,96	1,94	6,06
	3	-	-	1,03	4,72	1,25	4,82	1,57	4,91
	4	-	-	0,84	3,85	1,02	3,94	1,28	4,01
	5	-	-	0,65	2,98	0,79	3,04	0,99	3,10
	6	-	-	0,58	2,68	0,71	2,74	0,89	2,78
	7	-	-	0,49	2,26	0,60	2,31	0,75	2,35
	8	-	-	0,42	1,94	0,51	1,99	0,65	2,02
	9	-	-	0,36	1,63	0,43	1,66	0,54	1,69
	10	-	-	0,26	1,44	0,38	1,47	0,48	1,50
ЦЕМІ52,5Н+КІВП	1	-	-	1,10	5,95	1,57	6,09	1,98	6,19
	2	-	-	0,86	4,66	1,23	4,77	1,55	4,85
	3	-	-	0,72	3,89	1,03	3,98	1,30	4,05
	4	-	-	0,55	2,98	0,79	3,04	0,99	3,10
	5	-	-	0,49	2,62	0,69	2,68	0,87	2,73
	6	-	-	0,45	2,41	0,64	2,46	0,80	2,50
	7	-	-	0,43	1,98	0,52	2,03	0,66	2,06
	8	-	-	0,37	1,68	0,49	1,72	0,56	1,75

Продолжение таблицы 4

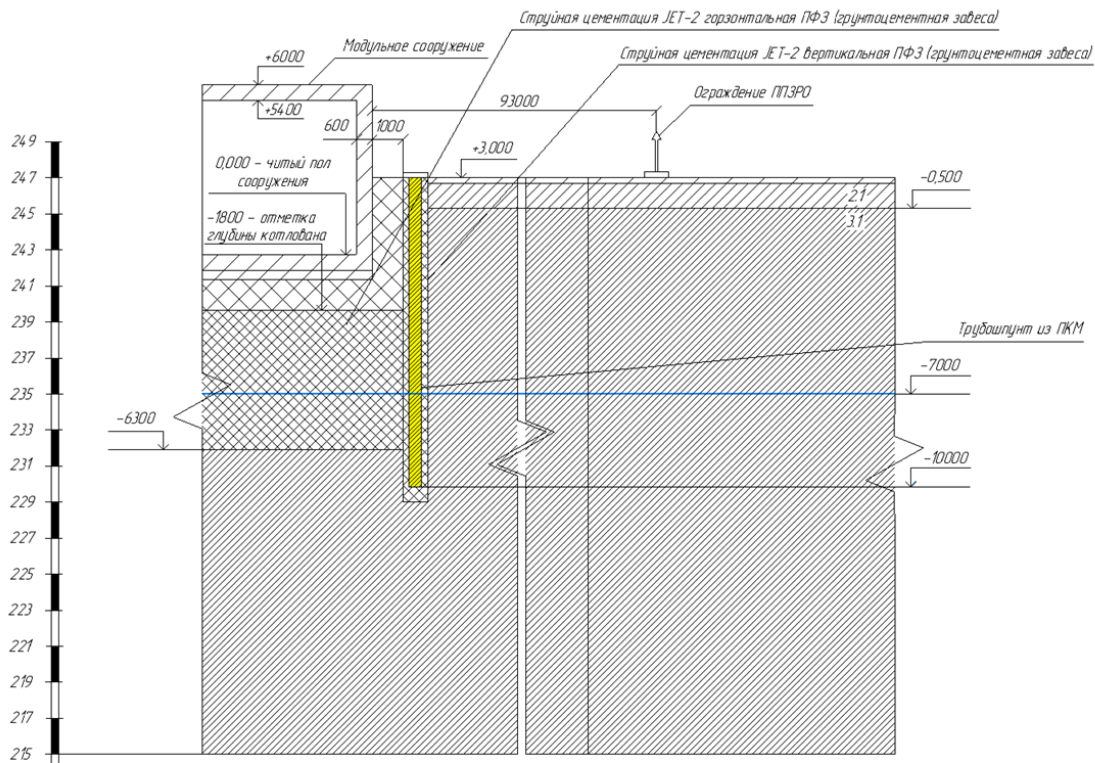
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦЕМІ52,5Н+РИВП	1	-	-	1,12	5,73	1,52	5,86	1,91	5,96
	2	-	-	0,93	4,75	1,26	4,86	1,58	4,94
	3	-	-	0,75	3,87	1,02	3,96	1,29	4,03
	4	-	-	0,55	2,84	0,75	2,91	0,95	2,96
	5	-	-	0,52	2,69	0,71	2,75	0,90	2,80
	6	-	-	0,47	2,39	0,63	2,45	0,80	2,49
	7	-	-	0,42	1,93	0,51	1,98	0,64	2,01
	8	-	-	0,38	1,73	0,91	1,77	0,58	1,80
ЦЕМІ52,5Н+КГВП	1	-	-	0,36	1,74	0,41	1,78	0,56	1,81
	2	-	-	0,35	1,67	0,39	1,71	0,54	1,74
	3	-	-	0,34	1,62	0,38	1,66	0,52	1,68
	4	-	-	0,32	1,53	0,36	1,56	0,49	1,59
	5	-	-	0,28	1,37	0,32	1,40	0,44	1,43
	6	-	-	0,27	1,31	0,31	1,34	0,42	1,36
	7	-	-	0,25	1,26	0,29	1,29	0,41	1,31
	8	-	-	0,25	1,21	0,29	1,24	0,39	1,26
	9	-	-	0,24	1,17	0,28	1,20	0,38	1,22
ЦЕМІ52,5Н+РГВП	1	-	-	1,55	7,09	1,87	7,25	2,36	7,38
	2	-	-	1,13	5,19	1,37	5,31	1,73	5,40
	3	-	-	0,94	4,31	1,14	4,41	1,44	4,49
	4	-	-	0,77	3,51	0,93	3,59	1,17	3,65
	5	-	-	0,58	2,66	0,70	2,72	0,89	2,77
	6	-	-	0,54	2,46	0,65	2,52	0,82	2,56
	7	-	-	0,47	2,17	0,57	2,22	0,72	2,26
	8	-	-	0,40	1,83	0,52	1,87	0,61	1,90
	9	-	-	0,34	1,55	0,48	1,59	0,52	1,62
	10	-	-	0,30	1,39	0,46	1,42	0,49	1,44

# Приложение В







## ПЛАН СООРУЖЕНИЙ ППЗРО



### ПОПЕРЕЧНЫЙ РАЗРЕЗ 1-1 ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ



**ПОКАЗАТЕЛЬ**  
**текучности и водонасыщения грунтов**

ПЕСЧАНЫХ		ГЛИНИСТЫХ	
МАЛОГО УРОВНЯ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ		ТВЕРДЫЕ	
		ПОЛУТВЕРДЫЕ	
		ТУГОПЛАСТИЧНЫЕ	
СРЕДНЕГО УРОВНЯ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ		ПЛАСТИЧНЫЕ (ДЛЯ СУПСИ)	
		МЯГКОПЛАСТИЧНЫЕ	
		ТЕКУЧЕПЛАСТИЧНЫЕ	
НАСЫЩЕННЫЕ ВОДОЙ		ТЕКУЧИЕ	

10 - глубина установившегося уровня подземной воды

эоиндекс	Геологическая колонка	Краткое описание грунтов
pN-Q	2.1	Суглинок пролювиальный
elQ <sub>4</sub>	3.1	Суглинок элювиальный
elMZ		Щебенитый элювиальный грунт сильновыветренный
S <sub>1-2</sub>		Сланец, сильновыветренный, малопрочный
		Грунтоцемент ПФЗ

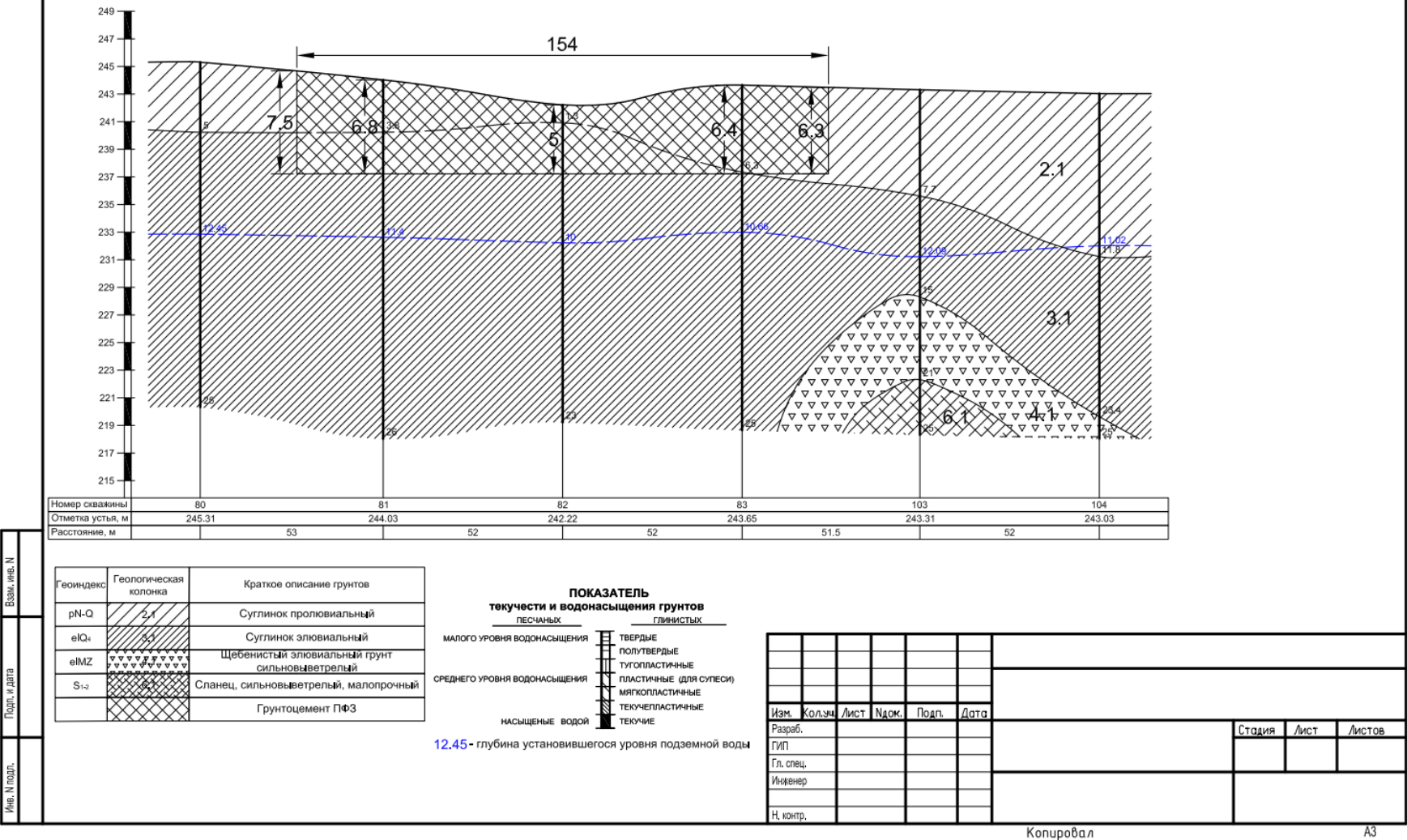
Номер скважины	82
Отметка устья, м	242,22

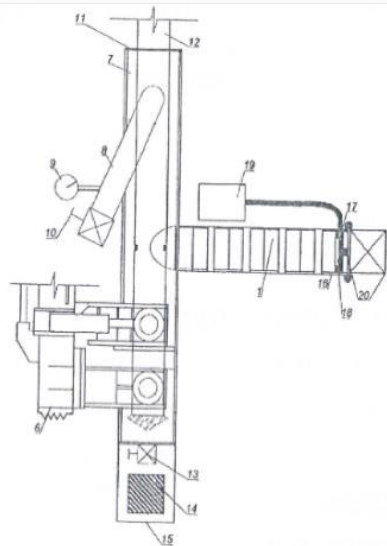
Инв. N подл.	Подп. и дата	Взам. инв. N
--------------	--------------	--------------

Изм.	Кол-во	Лист	Ндок.	Подп.	Дата							
Разраб.										Стадия	Лист	Листов
ГИП												
Гл. спец.												
Инженер												
Н. контр.												



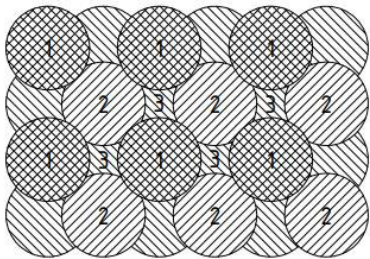
ПРОДОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ 2-2 ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ





В грунтозаборнике 1 осуществляется гидравлическое разрушение отобранного образца грунта монитором буровой установки с фиксацией скорости подъема и вращения монитора, расхода раствора и остальных параметров струйной технологии (патент №2461682) Грунтозаборник 1 – в виде гильз разборный колонковый буровой инструмент, задавливаемый буровой установкой и в дальнейшем извлекаемый на поверхность при наполнении грунтом. Грунтозаборник 1 снабжен крышкой 16, в которую вмонтирована система регистрации данных 17, включающая датчик 18, соединенный с контрольно измерительной аппаратурой 19. В крышку 16 заборника 1 внесена система нагружения 20 для моделирования бытового давления. Кондуктор 7 имеет сливное устройство 8 для удаления излишков рабочего раствора с манометром 9 и обратным клапаном 10. Кондуктор 7 имеет заглушку 11 для герметизации полости кондуктора при подъеме бурового става 12 в период испытания. Кондуктор 7 необходим для погружения в него монитора буровой установки 6 и перпендикулярно - грунтозаборника 1 для размыва образца грунта, сливной кран 13 - для отбора цементогрунтовой смеси в форму 14 (кубики 10х10х10см), которая установлена на поддоне 15.

Последовательность выполнения струйной технологии

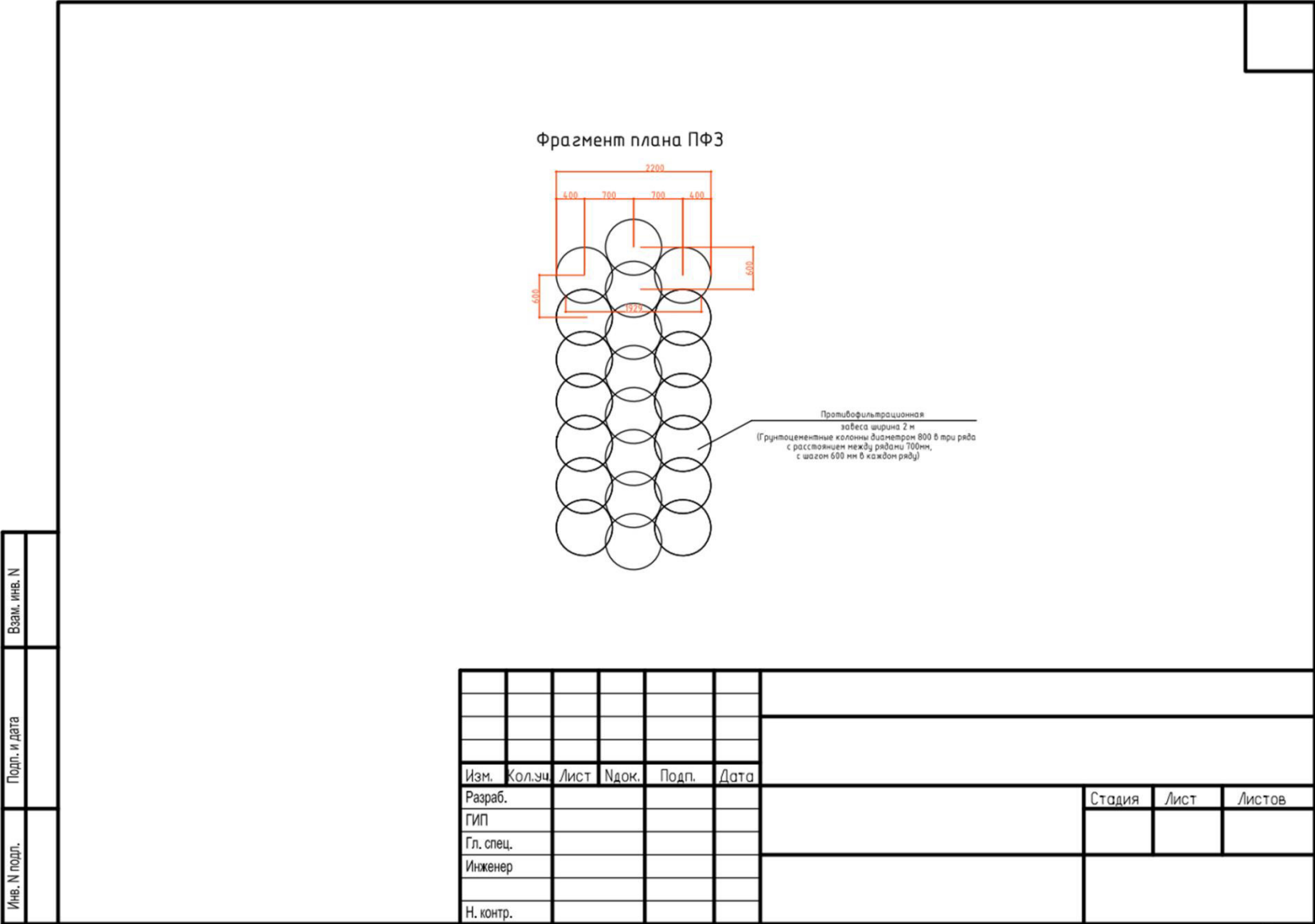


На 9 опытных участках выполнить 18 опытных ЦГЗ.  
Выполнить колонковое бурение отобрать керны грунтоцемента согласно с ОП 291325800.2017 для каждого ИГЗ.  
Определить сплочность закрепления геофизическими методами.  
Примечание (контрольные) значения технологических параметров для работы 8 слое ИГЗ1:  
Расход цемента на куб.м грунтоцементной смеси - 530-632 кг при соответствующем водо/цементном соотношении 0,8-1;  
На погонный метр ЦГЗ диаметром 0,8 м расход - 172,25-266,59 при водо/цементном соотношении 0,8;  
Расход инъекционного раствора на погонный метр - 0,5 м3/м при плотности раствора 1776 кг/м3;  
Выход пульпы - 0,00008 м3= 0,08 литра (предварительный расход должен превышать расход шлама);  
Давление подачи инъекционного раствора, МПа - 30 - 60  
Расход инъекционного раствора, л/мин - 70 - 200  
Диаметр сопла, мм 15 - 30  
Скорость вращения, об/мин 30  
Скорость подъема бурового става, см/мин - 15 - 40.  
Следующие параметры - давление подачи раствора, скорость вращения и скорость подъема - должны уточняться непосредственно на объекте. Технологические параметры определяются по методике Патента РФ №2461682 «Способ определения диаметров колонн, возводимых в грунте методом струйной геотехнологии».

Ведомость расхода цемента

Очередь ЦГЗ	Рисунок поперечного сечения	Площадь, м2	Расход сухой цементной смеси, кг/п.м.	Расход КДСЦ, кг	Расход жидкого стекла, кг	Количество свай	Расход цемента, т
1		1.130	598.90	6.59	5.99	1918	29865.95
2		1.100	583.00	6.41	5.83	959	14536.52
3		1.050	556.50	6.12	5.57	959	13875.77

Имя	Колон	Лист	Наим.	Подп.	Дата	Статус	Лист	Листов
Разработ.								
Гип.								
Гл. спец.								
Инженер								
Н. контр.								



Копировал

A4

Таблица 1. Расчёт нагрузки на самозабуривающийся анкер (отрезок штанги длиной 1 м)

№	Материал	Диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Внутр. диаметр трубы, мм	Длина штанги, м	Момент инерции (I <sub>x,y</sub> )		Момент сопротивления (W)		Площадь сечения (A <sub>s</sub> )		Вес (m), кг/пм	Модуль упругости (E), МПа	Жесткость стенки (EJ), МПа*м <sup>2</sup>	Сопротив -ление на изгиб (R), МПа	Прогиб трубы в момент инерции (H <sub>max</sub> ), мм	Напря- жение (σ <sub>w</sub> ), МПа	Изги- бающий момент (M), МН*м
						см <sup>4</sup>	м <sup>4</sup>	см <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	см <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>							
1	Сталь	30	7	16	1-10	3,65	3,6525E-08	2,44	2,43502E-06	5,06	0,00050554	4,0	210000	0,00767	320	1060977,39	597344,929	0,000779
2		30	8	14	1-10	3,79	3,7856E-08	2,52	2,52372E-06	5,53	0,00055264	4,3	210000	0,00795	320	1023685,65	576349,166	0,000808
3		30	9,5	11	1-10	3,90	3,9022E-08	2,60	2,60149E-06	6,12	0,00061152	4,8	210000	0,00819	320	993085,47	559120,844	0,000832
4		40	10	20	1-9	11,78	1,1775E-07	5,89	5,8875E-06	9,42	0,000942	7,4	210000	0,02473	320	329108,11	247056,553	0,001884
5		40	12	16	1-9	12,24	1,2238E-07	6,12	6,11923E-06	10,55	0,00105504	8,3	210000	0,02570	320	316644,97	237700,655	0,001958
6		52	13	26	1-6	33,63	3,3631E-07	12,93	1,29348E-05	15,92	0,00159198	12,5	210000	0,07062	320	115229,90	112451,776	0,004139
7		73	8,5	56	1-4	91,08	9,1078E-07	24,95	2,4953E-05	17,22	0,00172151	13,5	210000	0,19126	320	42548,50	58291,4547	0,007985
8		73	10	53	1-4	100,62	1,0062E-06	27,57	2,75661E-05	19,78	0,0019782	15,5	210000	0,21129	320	38515,15	52765,7677	0,008821
9		73	14	35	1-4	131,97	1,3197E-06	36,16	3,61552E-05	32,22	0,00322164	25,3	210000	0,27713	320	29365,41	40230,6175	0,01157
10		73	19	45	1-4	119,21	1,1921E-06	32,66	3,26603E-05	25,94	0,00259364	20,4	210000	0,25034	320	32507,69	44535,5504	0,010451
11		76	12,5	51	1-4	130,49	1,3049E-06	34,34	3,43398E-05	24,92	0,00249238	19,6	210000	0,27403	320	29697,34	42357,3689	0,010989
12		76	14,5	47	1-4	139,74	1,3974E-06	36,77	3,67743E-05	28,00	0,0028001	22,0	210000	0,29346	320	27731,40	39553,3425	0,011768
13		103	12,5	78	1-4	370,60	3,706E-06	71,96	7,19607E-05	35,52	0,00355213	27,9	210000	0,77826	320	10456,75	20213,0512	0,023027
14		103	26	51	1-4	519,01	5,1901E-06	100,78	0,000100779	62,86	0,00628628	49,3	210000	1,08992	320	7466,60	14433,0452	0,032249
15	Стеклопластик	30	8	14	1-10	3,79	3,7856E-08	2,52	2,52372E-06	5,53	0,00055264	1,1	25000	0,00095	365	8598959,46	576349,166	0,000921
16		38	8	22	1-10	9,08	9,0809E-08	4,78	4,77941E-06	7,54	0,0007536	1,5	25000	0,00227	365	3584683,79	304335,743	0,001744
17		42	8	26	1-10	13,02	1,3025E-07	6,20	6,20225E-06	8,54	0,00085408	1,7	25000	0,00326	365	2499253,98	234519,088	0,002264
18		42	10	22	1-10	14,12	1,4117E-07	6,72	6,72259E-06	10,05	0,0010048	2,0	25000	0,00353	365	2305806,39	216366,81	0,002454
19		57	6	45	1-10	31,67	3,1672E-07	11,11	1,11129E-05	9,61	0,00096084	1,9	25000	0,00792	365	1027797,53	130888,334	0,004056
20		57	8	41	1-10	37,93	3,7926E-07	13,31	1,33075E-05	12,31	0,00123088	2,4	25000	0,00948	365	858294,12	109302,352	0,004857
21		57	10	37	1-10	42,60	4,2595E-07	14,95	1,49457E-05	14,76	0,0014758	2,9	25000	0,01065	365	764218,13	97321,9284	0,005455
22		73	9	55	1-10	94,43	9,4434E-07	25,87	2,58722E-05	18,09	0,00180864	3,5	25000	0,02361	365	344708,64	56220,3496	0,009443
23		73	14	45	1-10	119,21	1,1921E-06	32,66	3,26603E-05	25,94	0,00259364	5,1	25000	0,02980	365	273064,63	44535,5504	0,011921
24		73	19	35	1-10	131,97	1,3197E-06	36,16	3,61552E-05	32,22	0,00322164	6,3	25000	0,03299	365	246669,43	40230,6175	0,013197
25		103	13	77	1-10	379,73	3,7973E-06	73,73	7,37346E-05	36,74	0,0036738	7,2	25000	0,09493	365	85723,57	19726,7714	0,026913
26		103	26	51	1-10	519,01	5,1901E-06	100,78	0,000100779	62,86	0,00628628	12,3	25000	0,12975	365	62719,45	14433,0452	0,036784

Таблица 2. Расчёт нагрузки на тубовой шпунт

№	Материал	Диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Внутр. диаметр трубы, мм	Момент инерции (I <sub>x</sub> ,y)		Момент сопротивления (W)		Площадь сечения (A <sub>s</sub> )		Вес (m), кг/пм	Модуль упругости (E), МПа	Жесткость стенки (EJ), МПа*м <sup>2</sup>	Сопротив- ление на изгиб (R), МПа	Прогиб трубы в момент инерции (H <sub>max</sub> ), мм	Напря- жение (σ <sub>w</sub> ), МПа	Изги- бающий момент (M), МН*м
					см <sup>4</sup>	м <sup>4</sup>	см <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	см <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>							
1	Углепластик	200	8	184	2226	2,2263E-05	222,6	0,00022263	48,2	0,004823	7,3	61000	1,4	442	5992,421	6533,42084	0,10
2		300	8	284	7824	7,8236E-05	521,6	0,00052157	73,4	0,007335	11,1	61000	4,8	442	1705,238	2788,78151	0,23
3		400	8	384	18922	0,00018922	946,1	0,0009461	98,5	0,009847	14,9	61000	11,5	442	705,051	1537,4061	0,42
4		500	8	484	37406	0,00037406	1496,2	0,00149623	123,6	0,012359	18,7	61000	22,8	442	356,656	972,137152	0,66
5		600	8	584	65159	0,00065159	2172,0	0,00217196	148,7	0,014871	22,5	61000	39,7	442	204,746	669,691031	0,96
6		700	8	684	104065	0,00104065	2973,3	0,00297329	173,8	0,017383	26,2	61000	63,5	442	128,199	489,203292	1,31
7		800	8	784	156009	0,00156009	3900,2	0,00390022	199,0	0,019895	30,0	61000	95,2	442	85,514	372,938987	1,72
8		200	15	170	3752	3,7523E-05	375,2	0,00037523	87,1	0,008714	13,2	61000	2,3	442	3555,471	3876,46103	0,17
9		300	15	270	13667	0,00013667	911,1	0,00091112	134,2	0,013424	20,3	61000	8,3	442	976,162	1596,43664	0,40
10		400	15	370	33649	0,00033649	1682,4	0,00168245	181,3	0,018134	27,4	61000	20,5	442	396,476	864,540696	0,74
11		500	15	470	67231	0,00067231	2689,3	0,00268925	228,4	0,022844	34,5	61000	41,0	442	198,435	540,87381	1,19
12		600	15	570	117946	0,00117946	3931,5	0,00393154	275,5	0,027554	41,6	61000	71,9	442	113,111	369,968369	1,74
13		700	15	670	189326	0,00189326	5409,3	0,00540932	322,6	0,032264	48,7	61000	115,5	442	70,466	268,896102	2,39
14		800	15	770	284904	0,00284904	7122,6	0,0071226	369,7	0,036974	55,8	61000	173,8	442	46,826	204,215572	3,15
15	Стеклопластик	200	8	184	2226	2,2263E-05	222,6	0,00022263	48,2	0,004823	9,4	25000	0,6	365	14621,507	6533,42084	0,08
16		300	8	284	7824	7,8236E-05	521,6	0,00052157	73,4	0,007335	14,3	25000	2,0	365	4160,780	2788,78151	0,19
17		400	8	384	18922	0,00018922	946,1	0,0009461	98,5	0,009847	19,2	25000	4,7	365	1720,323	1537,4061	0,35
18		500	8	484	37406	0,00037406	1496,2	0,00149623	123,6	0,012359	24,1	25000	9,4	365	870,240	972,137152	0,55
19		600	8	584	65159	0,00065159	2172,0	0,00217196	148,7	0,014871	29,0	25000	16,3	365	499,580	669,691031	0,79
20		700	8	684	104065	0,00104065	2973,3	0,00297329	173,8	0,017383	33,9	25000	26,0	365	312,804	489,203292	1,09
21		800	8	784	156009	0,00156009	3900,2	0,00390022	199,0	0,019895	38,8	25000	39,0	365	208,655	372,938987	1,42
22		200	15	170	3752	3,7523E-05	375,2	0,00037523	87,1	0,008714	17,0	25000	0,9	365	8675,348	3876,46103	0,14
23		300	15	270	13667	0,00013667	911,1	0,00091112	134,2	0,013424	26,2	25000	3,4	365	2381,836	1596,43664	0,33
24		400	15	370	33649	0,00033649	1682,4	0,00168245	181,3	0,018134	35,4	25000	8,4	365	967,402	864,540696	0,61
25		500	15	470	67231	0,00067231	2689,3	0,00268925	228,4	0,022844	44,5	25000	16,8	365	484,181	540,87381	0,98
26		600	15	570	117946	0,00117946	3931,5	0,00393154	275,5	0,027554	53,7	25000	29,5	365	275,991	369,968369	1,44
27		700	15	670	189326	0,00189326	5409,3	0,00540932	322,6	0,032264	62,9	25000	47,3	365	171,936	268,896102	1,97
28		800	15	770	284904	0,00284904	7122,6	0,0071226	369,7	0,036974	72,1	25000	71,2	365	114,256	204,215572	2,60

Таблица 3. Результаты расчёта

ОСАДКИ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА					
№	Расстояние от стены (м)	Осадка поверхности (см)	№	Расстояние от стены (м)	Осадка поверхности (см)
1	0,00	2,45	42	5,08	1,53
2	0,12	2,40	43	5,20	1,50
3	0,25	2,35	44	5,33	1,46
4	0,37	2,30	45	5,45	1,42
5	0,50	2,25	46	5,57	1,38
6	0,62	2,20	47	5,70	1,34
7	0,74	2,15	48	5,82	1,29
8	0,87	2,10	49	5,95	1,25
9	0,99	2,05	50	6,07	1,20
10	1,11	2,00	51	6,19	1,15
11	1,24	1,95	52	6,32	1,11
12	1,36	1,90	53	6,44	1,06
13	1,49	1,85	54	6,57	1,02
14	1,61	1,80	55	6,69	0,98
15	1,73	1,75	56	6,81	0,93
16	1,86	1,70	57	6,94	0,89
17	1,98	1,65	58	7,06	0,85
18	2,11	1,60	59	7,18	0,81
19	2,23	1,55	60	7,31	0,77
20	2,35	1,57	61	7,43	0,73
21	2,48	1,58	62	7,56	0,70
22	2,60	1,60	63	7,68	0,66
23	2,73	1,62	64	7,80	0,63
24	2,85	1,64	65	7,93	0,60
25	2,97	1,65	66	8,05	0,57
26	3,10	1,67	67	8,18	0,54
27	3,22	1,68	68	8,30	0,51
28	3,34	1,69	69	8,42	0,49
29	3,47	1,70	70	8,55	0,46
30	3,59	1,70	71	8,67	0,43
31	3,72	1,71	72	8,80	0,41
32	3,84	1,71	73	8,92	0,38
33	3,96	1,70	74	9,04	0,36
34	4,09	1,70	75	9,17	0,34
35	4,21	1,69	76	9,29	0,32
36	4,34	1,68	77	9,41	0,29
37	4,46	1,66	78	9,54	0,27
38	4,58	1,64	79	9,66	0,25
39	4,71	1,62	80	9,79	0,23
40	4,83	1,59	81	9,91	0,20
41	4,96	1,56			

Таблица 4. ИГЭ-2.1 суглинок пролювиальный (Время для заданного отрезка высоты 1 сек)

Исходные данные	Ед. изм.	ТП1	ТП2	ТП3	ТП4	ТП5	ТП6	ТП7	ТП8	ТП9	ТП10	ТП11	ТП12	ТП13	ТП14	ТП15	ТП16
Водоцементное отношение		0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1
Плотность цемента	т/м³	3,1				1,6				3,1				1,6			
Требуемый диаметр ЦГЭ	м	0,8				0,8				1,0				1,0			
Заданный отрезок высоты укрепляемого мас.	м	0,04				0,04				0,04				0,04			
Пористость грунта $p=e/(1+e) = 0,886/(1+0,886)$		0,375				0,375				0,47				0,47			
Плотность частиц грунта	т/м³	2,68				2,68				2,74				2,74			
Коэффициент водонасыщенности грунта		0,7				0,7				0,87				0,87			
Скорость вращения монитора	об/мин	30				30				30				30			
1 допущение - объем излившейся пульпы равен объему поступившего раствора																	
Коэффициент объема раствора к объему скважины		1				1				1				1			
Время для заданного отрезка высоты	сек	1				1				1				1			
Расчет объема грунта заданного отрезка мас.	м³	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314
РАСЧЕТ технологических параметров струйной цементации (полный круг). Расход раствора 1,7 л/сек (100 л/мин), время заданного отрезка 1 сек																	
Заданный расход раствора	л/мин	100				100				100				100			
Расход раствора от насоса	м³/сек	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017
Расход цемента	т/сек	0,0017	0,0015	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0011	0,0010	0,0016	0,0015	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0011	0,0010
Расход воды	т/сек	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013	0,0009	0,0010	0,0010	0,0010	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0009	0,0009	0,0010	0,0010
Плотность цементогрунта	тн/м³	2,026	2,021	2,017	2,013	1,994	1,992	1,991	1,989	2,034	2,031	2,028	2,026	2,014	2,012	2,012	2,011
Отношение массы цемента к весу цементогрунта		4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Масса цемента в 1 м3 ЦГЭ после закрепления	т	0,0818	0,0745	0,0684	0,0632	0,0631	0,0587	0,0548	0,0514	0,0531	0,0484	0,0444	0,0411	0,0410	0,0381	0,0356	0,0334
Расход цемента в растворе на 1 м3 ЦГЭ	т	0,0813	0,0740	0,0680	0,0628	0,0627	0,0583	0,0545	0,0511	0,0520	0,0474	0,0435	0,0402	0,0401	0,0373	0,0349	0,0327
Расход цемента в составе струи раствора	кг	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
Масса цемента в цементогрунте за цикл	кг	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
Потери цемента с выходом пульпы за цикл	кг	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Содержание цемента в грунтоцементе свай		2,6%	2,4%	2,2%	2,0%	3,9%	3,7%	3,4%	3,2%	1,7%	1,6%	1,4%	1,3%	2,6%	2,4%	2,2%	2,1%
РАСЧЕТ технологических параметров струйной цементации (полный круг). Расход раствора 6,7 л/сек (400 л/мин), время заданного отрезка 1 сек																	
Заданный расход раствора	л/мин	400				400				400				400			
Расход раствора от насоса	м³/сек	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
Расход цемента	т/сек	0,0065	0,0059	0,0055	0,0050	0,0050	0,0047	0,0044	0,0041	0,0065	0,0059	0,0055	0,0050	0,0050	0,0047	0,0044	0,0041
Расход воды	т/сек	0,0046	0,0048	0,0049	0,0050	0,0035	0,0037	0,0039	0,0041	0,0046	0,0048	0,0049	0,0050	0,0035	0,0037	0,0039	0,0041
Плотность цементогрунта	тн/м³	1,962	1,945	1,930	1,918	1,850	1,844	1,839	1,835	1,991	1,979	1,969	1,961	1,915	1,911	1,908	1,904
Отношение массы цемента к весу цементогрунта		15%	13%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	6%
Масса цемента в 1 м3 ЦГЭ после закреплен	т	0,2882	0,2625	0,2410	0,2228	0,2224	0,2068	0,1932	0,1813	0,1956	0,1782	0,1636	0,1513	0,1510	0,1404	0,1312	0,1231
Расход цемента в растворе на 1 м3 ЦГЭ	т	0,3244	0,2955	0,2714	0,2508	0,2504	0,2328	0,2175	0,2042	0,2076	0,1891	0,1736	0,1605	0,1602	0,1490	0,1392	0,1306
Расход цемента в составе струи раствора	кг	6,5	5,9	5,5	5,0	5,0	4,7	4,4	4,1	6,5	5,9	5,5	5,0	5,0	4,7	4,4	4,1
Масса цемента в цементогрунте за цикл	кг	5,8	5,3	4,8	4,5	4,5	4,2	3,9	3,6	6,1	5,6	5,1	4,7	4,7	4,4	4,1	3,9
Потери цемента с выходом пульпы за цикл	кг	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
Содержание цемента в грунтоцементе свай		9,3%	8,5%	7,8%	7,2%	13,9%	12,9%	12,1%	11,3%	6,3%	5,7%	5,3%	4,9%	9,4%	8,8%	8,2%	7,7%



Таблица 5. ИГЭ-3.1 суглинок элювиальный

Исходные данные	Ед. изм.	ТП17	ТП18	ТП19	ТП20	ТП21	ТП22	ТП23	ТП24	ТП25	ТП26	ТП27	ТП28	ТП29	ТП30	ТП31	ТП32	
Водоцементное отношение		0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	
Плотность цемента	т/м³	3,1				1,6				3,1				1,6				
Требуемый диаметр ЦГЭ	м	0,8				0,8				1,0				1,0				
Заданный отрезок высоты укрепляемого мас.	м	0,04				0,04				0,04				0,04				
Пористость грунта $p=e/(1+e) = 0,886/(1+0,886)$		0,47				0,47				0,47				0,47				
Плотность частиц грунта	т/м³	2,74				2,74				2,74				2,74				
Коэффициент водонасыщенности грунта		0,87				0,87				0,87				0,87				
Скорость вращения монитора	об/мин	30				30				30				30				
1 допущение - объем излившейся пульпы равен объему поступившего раствора																		
Коэффициент объема раствора к объему скважины		1				1				1				1				
Время для заданного отрезка высоты		1				1				1				1				
Расчет объема грунта заданного отрезка мас.		м³	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	
РАСЧЕТ технологических параметров струйной цементации (полный круг). Расход раствора 1,7 л/сек (100 л/мин), время заданного отрезка 1 сек																		
Заданный расход раствора		л/мин	100				100				100				100			
Расход раствора от насоса		м³/сек	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	
Расход цемента		т/сек	0,0016	0,0015	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0011	0,0010	0,0016	0,0015	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0011	
Расход воды		т/сек	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0009	0,0009	0,0010	0,0010	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0009	0,0009	0,0010	
Плотность цементогрунта		тн/м³	1,908	1,903	1,899	1,895	1,876	1,875	1,873	1,872	1,913	1,910	1,907	1,905	1,892	1,891	1,890	
Отношение массы цемента к весу цементогрунта			4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	
Масса цемента в 1 м³ ЦГЭ после закрепления		т	0,0816	0,0743	0,0683	0,0631	0,0630	0,0586	0,0547	0,0514	0,0530	0,0483	0,0444	0,0410	0,0409	0,0381	0,0356	
Расход цемента в растворе на 1 м³ ЦГЭ		т	0,0811	0,0739	0,0678	0,0627	0,0626	0,0582	0,0544	0,0510	0,0519	0,0473	0,0434	0,0401	0,0401	0,0373	0,0348	
Расход цемента в составе струи раствора		кг	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	
Масса цемента в цементогрунте за цикл		кг	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	
Потери цемента с выходом пульпы за цикл		кг	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Содержание цемента в грунтоцементе сваи			2,6%	2,4%	2,2%	2,0%	3,9%	3,7%	3,4%	3,2%	1,7%	1,6%	1,4%	1,3%	2,6%	2,4%	2,2%	
РАСЧЕТ технологических параметров струйной цементации (полный круг). Расход раствора 6,7 л/сек (400 л/мин), время заданного отрезка 1 сек																		
Заданный расход раствора		л/мин	400				400				400				400			
Расход раствора от насоса		м³/сек	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	
Расход цемента		т/сек	0,0065	0,0059	0,0055	0,0050	0,0050	0,0047	0,0044	0,0041	0,0065	0,0059	0,0055	0,0050	0,0050	0,0047	0,0044	
Расход воды		т/сек	0,0046	0,0048	0,0049	0,0050	0,0035	0,0037	0,0039	0,0041	0,0046	0,0048	0,0049	0,0050	0,0035	0,0037	0,0039	
Плотность цементогрунта		тн/м³	1,870	1,853	1,838	1,826	1,758	1,752	1,747	1,743	1,887	1,876	1,866	1,857	1,812	1,808	1,804	
Отношение массы цемента к весу цементогрунта			15%	14%	13%	12%	13%	12%	11%	10%	10%	10%	9%	8%	8%	8%	7%	
Масса цемента в 1 м³ ЦГЭ после закреплен		т	0,2882	0,2625	0,2410	0,2228	0,2224	0,2068	0,1932	0,1813	0,1957	0,1782	0,1637	0,1513	0,1510	0,1404	0,1312	
Расход цемента в растворе на 1 м³ ЦГЭ		т	0,3244	0,2955	0,2714	0,2508	0,2504	0,2328	0,2175	0,2042	0,2076	0,1891	0,1737	0,1605	0,1602	0,1490	0,1392	
Расход цемента в составе струи раствора		кг	6,5	5,9	5,5	5,0	5,0	4,7	4,4	4,1	6,5	5,9	5,5	5,0	5,0	4,7	4,4	
Масса цемента в цементогрунте за цикл		кг	5,8	5,3	4,8	4,5	4,5	4,2	3,9	3,6	6,1	5,6	5,1	4,8	4,7	4,4	4,1	
Потери цемента с выходом пульпы за цикл		кг	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	
Содержание цемента в грунтоцементе сваи			9,3%	8,5%	7,8%	7,2%	13,9%	12,9%	12,1%	11,3%	6,3%	5,7%	5,3%	4,9%	9,4%	8,8%	8,2%	



Таблица 6. Расчет технологических параметров слоев грунта ИГЭ2.1 суглинок пролювиальный

Исходные данные	Ед. изм.	Значение 1	Значение 2	Значение 3	Значение 4	Значение 5	Значение 6
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Водоцементное отношение		0,7	0,7	<b>0,7</b>	0,7	0,7	0,7
Плотность цемента	т/м <sup>3</sup>	1,6	1,6	<b>1,6</b>	1,6	1,6	1,6
Требуемый диаметр ЦГЭ	м	0,8	0,8	<b>0,8</b>	0,8	0,8	0,8
Заданный отрезок высоты укрепляемого массива	м	0,04	0,04	<b>0,04</b>	0,04	0,04	0,04
Пористость грунта $p=e/(1+e) = 0,601/(1+0,601)$		0,375	0,375	<b>0,375</b>	0,375	0,375	0,375
Плотность частиц грунта	т/м <sup>3</sup>	2,68	2,68	<b>2,68</b>	2,68	2,68	2,68
Коэффициент водонасыщенности грунта		0,7	0,7	<b>0,7</b>	0,7	0,7	0,7
Скорость вращения монитора	об/мин	30	30	<b>30</b>	30	30	30
1 допущение - объем излившейся пульпы равен объему поступившего раствора							
Коэффициент объема раствора к объему скважины		1	1	<b>1</b>	1	1	1
Время для заданного отрезка высоты	сек	18	20	<b>22</b>	24	26	28
Расчет объема грунта заданного отрезка массива	м <sup>3</sup>	0,0201	0,0201	<b>0,0201</b>	0,0201	0,0201	0,0201
Заданный расход раствора	л/мин	100	100	<b>100</b>	100	100	100
Расход раствора от насоса	м3/сек	0,0017	0,0017	<b>0,0017</b>	0,0017	0,0017	0,0017
Расход цемента	т/сек	0,0013	0,0013	<b>0,0013</b>	0,0013	0,0013	0,0013
Расход воды	т/сек	0,0009	0,0009	<b>0,0009</b>	0,0009	0,0009	0,0009
РАСЧЕТ							
Принимаем количество шагов итерации		100	100	<b>100</b>	100	100	100
Временный шаг	сек	0,18	0,2	<b>0,22</b>	0,24	0,26	0,28
Поступление объема раствора за шаг итерации	м <sup>3</sup>	0,00030006	0,0003334	<b>0,00036674</b>	0,00040008	0,00043342	0,00046676
Коэффициент объемных потерь за шаг итерации		0,9853	0,9837	<b>0,9821</b>	0,9805	0,9789	0,9773
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99 и т. д.		0,227161181	0,192930559	<b>0,163901751</b>	0,139277657	0,118384331	0,100651799
Время для заданного отрезка высоты	сек	18	20	<b>22</b>	24	26	28
Значения степени 100,99,98.....3,2,1		100	99	<b>98</b>	97	96	95
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=4сек		0,227161181	0,230552999	0,233995462	0,237489326	0,241035357	0,244634335
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=5сек		0,192930559	0,196131347	0,199385238	0,202693112	0,206055865	0,209474408
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=6сек		0,163901751	0,16689286	0,169938555	0,173039832	0,176197706	0,179413209
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=7сек		0,139277657	0,142050458	0,144878461	0,147762765	0,150704491	0,153704782
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=15сек		0,118384331	0,120937583	0,123545901	0,126210474	0,128932516	0,131713265
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=20сек		0,100651799	0,102989589	0,105381678	0,107829327	0,110333826	0,112896496
Сумма коэф объема потерь в убывающих степенях		53,2872	49,9874	<b>46,9917</b>	44,2670	41,7841	39,5173
Масса цемента в закрепляемом массиве	т	0,0121	0,0126	<b>0,0130</b>	0,0134	0,0137	0,0139
Масса грунта в закрепляемом массиве	т	0,0076	0,0065	<b>0,0055</b>	0,0047	0,0040	0,0034
Масса воды в закрепляемом массиве	т	0,0102	0,0103	<b>0,0103</b>	0,0104	0,0105	0,0105
Объем цемента	м <sup>3</sup>	0,0075	0,0079	<b>0,0081</b>	0,0084	0,0085	0,0087
Объем грунта	м <sup>3</sup>	0,0046	0,0039	<b>0,0033</b>	0,0028	0,0024	0,0020
Объем воды	м <sup>3</sup>	0,0102	0,0103	<b>0,0103</b>	0,0104	0,0105	0,0105
Итого расчетный объем на заданный отрезок	м <sup>3</sup>	0,0223	0,0220	<b>0,0218</b>	0,0216	0,0214	0,0212
Для заданного диаметра должен быть равен	м <sup>3</sup>	0,0201	0,0201	<b>0,0201</b>	0,0201	0,0201	0,0201

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8
Вторая итерация							
Объем раствора на цикл	м <sup>3</sup>	0,030006	0,03334	<b>0,036674</b>	0,040008	0,043342	0,046676
Масса цемента за цикл	т	0,0226	0,0252	<b>0,0277</b>	0,0302	0,0327	0,0352
Масса воды за цикл	т	0,0159	0,0176	<b>0,0194</b>	0,0211	0,0229	0,0247
Потери цемента с выходом пульпы за цикл	т	0,0106	0,0126	<b>0,0147</b>	0,0168	0,0190	0,0213
Потери воды с выходом пульпы за цикл	т	0,0057	0,0074	<b>0,0090</b>	0,0107	0,0124	0,0142
Итого объем шлама на заданный отрезок	м <sup>3</sup>	0,000025	0,000030	<b>0,000036</b>	0,000042	0,000049	0,000055
Отношение объема шлама к объему цементогрунта	%	0,122%	0,151%	<b>0,181%</b>	0,211%	0,242%	0,273%
Масса цемента в цементогрунте за цикл	т	0,0121	0,0126	<b>0,0130</b>	0,0134	0,0137	0,0139
Масса закрепляемого отрезка массива	т	0,0299	0,0293	<b>0,0289</b>	0,0285	0,0281	0,0278
Плотность цементогрунта	тн/м <sup>3</sup>	1,487	1,460	<b>1,436</b>	1,416	1,399	1,384
Отношение массы цемента к весу цементогрунта		40%	43%	<b>45%</b>	47%	49%	50%
Время для заданного отрезка высоты	сек	18	20	<b>22</b>	24	26	28
Масса цемента в 1 м <sup>3</sup> ЦГЭ после закрепления	т	0,6005	0,6259	<b>0,6472</b>	0,6651	0,6801	0,6927
Расход цемента в растворе на 1 м <sup>3</sup> ЦГЭ	т	1,1269	1,2521	<b>1,3773</b>	1,5025	1,6277	1,7529
Высота участка грунта в ЦГЭ	м	1	1	<b>1</b>	1	1	1
Количество отрезков по 4 см		25	25	<b>25</b>	25	25	25
Масса цемента в закрепляемом массиве	т	0,2	0,2	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,1
Масса грунта в закрепляемом массиве	т	0,3	0,3	<b>0,3</b>	0,3	0,3	0,3
Масса воды в закрепляемом массиве	т	0,2	0,2	<b>0,2</b>	0,2	0,2	0,2
Объем цемента	м <sup>3</sup>	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,1
Объем воды	м <sup>3</sup>	0,3	0,3	<b>0,3</b>	0,3	0,3	0,3
Итого объем шлама на заданный отрезок	м <sup>3</sup>	0,00062	0,00076	<b>0,00091</b>	0,00106	0,00122	0,00137
<b>Расход цемента в составе струи раствора</b>	кг	22,6	25,2	<b>27,7</b>	30,2	32,7	35,2
<b>Масса цемента в цементогрунте за цикл</b>	кг	12,1	12,6	<b>13,0</b>	13,4	13,7	13,9
<b>Потери цемента с выходом пульпы за цикл</b>	кг	10,6	12,6	<b>14,7</b>	16,8	19,0	21,3
<b>Время для заданного отрезка высоты</b>	сек	18	20	<b>22</b>	24	26	28
<b>Содержание цемента в грунтоцементе свай</b>		37,5%	39,1%	<b>40,5%</b>	41,6%	42,5%	43,3%

Таблица 7. Расчет технологических параметров слоев грунта ИГЭЗ.1 суглинок элювиальный

Исходные данные	Ед. изм.	Значение 1	Значение 2	Значение 3	Значение 4	Значение 5	Значение 6
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Водоцементное отношение		0,7	0,7	<b>0,7</b>	0,7	0,7	0,7
Плотность цемента	т/м³	1,6	1,6	<b>1,6</b>	1,6	1,6	1,6
Требуемый диаметр ЦГЭ	м	0,8	0,8	<b>0,8</b>	0,8	0,8	0,8
Заданный отрезок высоты укрепляемого массива	м	0,04	0,04	<b>0,04</b>	0,04	0,04	0,04
Пористость грунта $p=e/(1+e) = 0,601/(1+0,601)$		0,47	0,47	<b>0,47</b>	0,47	0,47	0,47
Плотность частиц грунта	т/м³	2,74	2,74	<b>2,74</b>	2,74	2,74	2,74
Коэффициент водонасыщенности грунта		0,87	0,87	<b>0,87</b>	0,87	0,87	0,87
Скорость вращения монитора	об/мин	30	30	<b>30</b>	30	30	30
1 допущение - объем излившейся пульпы равен объему поступившего раствора							
Коэффициент объема раствора к объему скважины		1	1	<b>1</b>	1	1	1
Время для заданного отрезка высоты	сек	19	21	<b>23</b>	25	27	29
Расчет объема грунта заданного отрезка массива	м³	0,0201	0,0201	<b>0,0201</b>	0,0201	0,0201	0,0201
Заданный расход раствора	л/мин	100	100	<b>100</b>	100	100	100
Расход раствора от насоса	м³/сек	0,0017	0,0017	<b>0,0017</b>	0,0017	0,0017	0,0017
Расход цемента	т/сек	0,0013	0,0013	<b>0,0013</b>	0,0013	0,0013	0,0013
Расход воды	т/сек	0,0009	0,0009	<b>0,0009</b>	0,0009	0,0009	0,0009
РАСЧЕТ							
Принимаем количество шагов итерации		100	100	<b>100</b>	100	100	100
Временный шаг	сек	0,19	0,21	<b>0,23</b>	0,25	0,27	0,29
Поступление объема раствора за шаг итерации	м³	0,00031673	0,00035007	<b>0,00038341</b>	0,00041675	0,00045009	0,00048343
Коэффициент объемных потерь за шаг итерации		0,9845	0,9829	<b>0,9813</b>	0,9797	0,9781	0,9765
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99 и т. д.		0,209340419	0,177818881	<b>0,151083882</b>	0,128402506	0,109154989	0,092817109
Время для заданного отрезка высоты	сек	19	21	<b>23</b>	25	27	29
Значения степени 100,99,98.....3,2,1		100	99	<b>98</b>	97	96	95
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=4сек		0,163901751	0,209340419	<b>0,212639801</b>	0,215991185	0,219395389	0,222853246
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=5сек		0,128402506	0,177818881	<b>0,180916465</b>	0,184068009	0,187274453	0,190536752
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=6сек		0,085597884	0,151083882	<b>0,153966399</b>	0,156903912	0,159897469	0,162948141
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=7сек		0,057156262	0,128402506	<b>0,131065311</b>	0,133783338	0,136557731	0,13938966
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=15сек		0,038226994	0,109154989	<b>0,111599732</b>	0,114099231	0,116654711	0,119267426
Коэффициент объемных потерь в степени 100, 99,98 для t=20сек		0,025608041	0,092817109	<b>0,09504992</b>	0,097336444	0,099677972	0,102075829
Сумма коэф объема потерь в убывающих степенях		51,5971	48,4537	<b>45,5974</b>	42,9970	40,6252	38,4578
Масса цемента в закрепляемом массиве	т	0,0123	0,0128	<b>0,0132</b>	0,0135	0,0138	0,0140
Масса грунта в закрепляемом массиве	т	0,0061	0,0052	<b>0,0044</b>	0,0037	0,0032	0,0027
Масса воды в закрепляемом массиве	т	0,0106	0,0106	<b>0,0107</b>	0,0107	0,0107	0,0107
Объем цемента	м³	0,0077	0,0080	<b>0,0082</b>	0,0085	0,0086	0,0088
Объем грунта	м³	0,0042	0,0036	<b>0,0030</b>	0,0026	0,0022	0,0019
Объем воды	м³	0,0106	0,0106	<b>0,0107</b>	0,0107	0,0107	0,0107
Итого расчетный объем на заданный отрезок	м³	0,0225	0,0222	<b>0,0219</b>	0,0217	0,0215	0,0213
Для заданного диаметра должен быть равен	м³	0,0201	0,0201	<b>0,0201</b>	0,0201	0,0201	0,0201

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8
Вторая итерация							
Объем раствора на цикл	м³	0,031673	0,035007	<b>0,038341</b>	0,041675	0,045009	0,048343
Масса цемента за цикл	т	0,0239	0,0264	<b>0,0289</b>	0,0315	0,0340	0,0365
Масса воды за цикл	т	0,0167	0,0185	<b>0,0203</b>	0,0220	0,0238	0,0255
Потери цемента с выходом пульпы за цикл	т	0,0116	0,0136	<b>0,0157</b>	0,0179	0,0202	0,0225
Потери воды с выходом пульпы за цикл	т	0,0061	0,0079	<b>0,0096</b>	0,0113	0,0131	0,0148
Итого объем шлама на заданный отрезок	м³	0,000027	0,000033	<b>0,000039</b>	0,000045	0,000051	0,000058
Отношение объема шлама к объему цементогрунта	%	0,133%	0,163%	<b>0,193%</b>	0,224%	0,256%	0,287%
Масса цемента в цементогрунте за цикл	т	0,0123	0,0128	<b>0,0132</b>	0,0135	0,0138	0,0140
Масса закрепляемого отрезка массива	т	0,0291	0,0286	<b>0,0283</b>	0,0280	0,0277	0,0274
Плотность цементогрунта	тн/м³	1,446	1,425	<b>1,407</b>	1,391	1,377	1,365
Отношение массы цемента к весу цементогрунта		42%	45%	<b>47%</b>	48%	50%	51%
Время для заданного отрезка высоты	сек	19	21	<b>23</b>	25	27	29
Масса цемента в 1 м³ ЦГЭ после закрепления	т	0,6137	0,6370	<b>0,6566</b>	0,6730	0,6867	0,6982
Расход цемента в растворе на 1 м³ ЦГЭ	т	1,1895	1,3147	<b>1,4399</b>	1,5651	1,6903	1,8155
Высота участка грунта в ЦГЭ	м	1	1	<b>1</b>	1	1	1
Количество отрезков по 4 см		25	25	<b>25</b>	25	25	25
Масса цемента в закрепляемом массиве	т	0,2	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,1
Масса грунта в закрепляемом массиве	т	0,3	0,3	<b>0,3</b>	0,3	0,3	0,3
Масса воды в закрепляемом массиве	т	0,2	0,2	<b>0,2</b>	0,2	0,2	0,2
Объем цемента	м³	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,0
Объем воды	м³	0,3	0,3	<b>0,3</b>	0,3	0,3	0,3
Итого объем шлама на заданный отрезок	м³	0,00067	0,00082	<b>0,00097</b>	0,00113	0,00128	0,00144
<b>Расход цемента в составе струи раствора</b>	кг	23,9	26,4	<b>28,9</b>	31,5	34,0	36,5
<b>Масса цемента в цементогрунте за цикл</b>	кг	12,3	12,8	<b>13,2</b>	13,5	13,8	14,0
<b>Потери цемента с выходом пульпы за цикл</b>	кг	11,6	13,6	<b>15,7</b>	17,9	20,2	22,5
<b>Время для заданного отрезка высоты</b>	сек	19	21	<b>23</b>	25	27	29
<b>Содержание цемента в грунтоцементе свай</b>		38,4%	39,8%	<b>41,0%</b>	42,1%	42,9%	43,6%

## Приложение Г

ООО «Строительная компания «ИнжПроектСтрой»  
614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 34  
ИНН/КПП 5902167342/590201001  
+7 342 204 01 15  
perm@maliningroup.com  
www.jet-grouting.info



**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ООО «СК  
«ИнжПроектСтрой»

А.Г. Малинин

«20» июля 2022 г.



от 20 июля 2022 г.

**о внедрении технологии струйной цементации при выполнении работ по  
укреплению основания фундаментов трех грузовых терминалов  
ООО «СК «ИнжПроектСтрой»**

Акт составлен в том, что в Рабочей документации «Укрепление грунтов в основании фундаментов трех грузовых терминалов» №1/01-22 были использованы результаты диссертационной работы Бамборина Михаила Юрьевича и прошли опробование в 2020-2022 году по адресу 618719, Пермский край, городской округ Добрянский, д. Залесная, ул. Заводская 1. На данном объекте было произведено укрепленных грунтов в основании фундаментов общей площадью 4320 кв.м.

Экономический эффект от применения свай струйной цементации взамен устройства буронабивных свай составил 8 963 365,00 руб.

Члены комиссии:

Руководитель проектного отдела  
ООО «СК «ИнжПроектСтрой»

 И.А. Салмин

Экономист  
ООО «СК «ИнжПроектСтрой»

 П.В. Кислухина



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор АО «Наука и инновации» -  
управляющей организацией  
АО «Гиредмет»



А.И. Голиней

«21» *сентября* 2023 г.

**АКТ**

внедрения технологии устройства противофильтрационной завесы из грунтоцементных анкеров с нагелями с применением струйной технологии «Рабочая документация. Гидротехнические решения. Основной комплект рабочих чертежей» № 11587-16-1-ГР-Д 00198396-004-2019-ГР разработанной на предприятии АО «Гиредмет» в рамках работ «РЕАБИЛИТАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ БЫВШИХ УРАНОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ КИРГИЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ «ТУЮК-СУУ» разработанной при участии и под руководством Бамборина Михаила Юрьевича в рамках договоров от 21.01.2020 № Ц-КС ИФ03-13441-3/20/223/7578-Д от 21.01.2020 и от 30.07.2020 № Ц-КС/ИФ03-13441-55/20/223/7853-Д между ФГУП «РосРАО» филиал «Центральная Азия» и АО «НИИГрафит» филиал «Туюк-Суу».

Приемочная комиссия произвела приемку рабочей документации и установила следующее:

1. Проект разработан на укрепление бортов хвостохранилища на объекте «Вывод из эксплуатации (ликвидации) хвостохранилища «Туюк-Суу» (Киргизская Республика) взамен проекта 110-9286-ПОДЗ (2005 г.) АО «ВНИПИпромтехнология» в связи с необходимостью армирования грунтоцемента в соответствии с п. 6.1.5 СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования».

2. Проектом предусмотрено укрепление бортов хвостохранилища путём устройства противооползневой завесы из грунтоцементных анкеров с нагелями с использованием струйной технологии на период откопки хвостохранилища для крепления склона под водоотводным каналом для обеспечения долговременной устойчивости и безопасности объекта.

3. Анкеры должны обладать следующими параметрами:

- нагрузка на пределе текучести – не менее 430 МПа;
- разрушающая нагрузка – не менее 540 МПа.

4. Последовательность работ при устройстве противофильтрационной завесы:

- с помощью бульдозера и экскаватора при необходимости расчищается площадка выполнения работ (участок шириной 10 м вдоль канала реки Туюк-Суу);

- бурение под наклоном лидерной скважины диаметром 90 мм ведётся буровой установкой до расчётной глубины 12 м;

- после достижения расчётной глубины, при вращении буровой штанги нагнетается густой цементный раствор, который вытесняет буровой шлам и обеспечивает несущую способность анкера по грунту (производится опрессовка);

- нагнетание густого цементного раствора производится через полость шланг и буровое долото;

- динамическая опрессовка скважины производится с непрерывным вращением винтовой тяги;


- смешение раствора происходит при помощи миксерной станции.


5. Грунтоцементные анкера с нагелями по струйной технологии выполняются в 4 ряда с шагом 3,2 метра.


6. Считать технологию устройства противofильтрационной завесы из грунтоцементных анкеров с нагелями с применением струйной технологии «Рабочая документация. Гидротехнические решения. Основной комплект рабочих чертежей» № 11587-16-1-ГР-Д 00198396-004-2019-ГР внедренной и использовать при выполнении работ.

7. В рамках договоров от 21.01.2020 № Ц-КС ИФ03-13441-3/20/223/7578-Д, от 30.07.2020 № Ц-КС ИФ03-13441-3/20/223/7853-Д установлено 679 грунтоцементных анкеров с нагелями с применением струйной технологии на территории хвостохранилища «Туюк-Суу».

Член комиссии:

Заместитель директора по науке и  
инновациям  
АО «Гиредмет»  
 К.В. Ивановских

Заместитель директора по  
перспективным проектам  
АО «Гиредмет»  
 Г.Л. Артамонов

Заместитель директора по правовой и  
корпоративной работе  
АО «Гиредмет»  
 Д.В. Садыков



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ФГУП «НО РАО»

И.М. Игин

2023 г.



АКТ

внедрения отчёта обоснования безопасности «Отчет по обоснованию безопасности на размещение и сооружение ППЗРО твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов (Челябинская область, Озерский городской округ)» ФГУП «НО РАО» (далее ООБ) разработанного на предприятии ФГУП «НО РАО» при участии Бамборина Михаила Юрьевича.

Приемочная комиссия произвела приемку ООБ и установила следующее:

1. В ООБ подробно представлено описание ППЗРО (условия размещения, компоновка, концепция обеспечения безопасности ППЗРО и др.);
2. Характеристика района и площадки размещения ППЗРО (гидрометеорологические условия, геолого-тектонические, гидрогеологические, гидрологические, сейсмические и инженерно-геологические условия и др.);
3. Общие положения по обеспечению безопасности ППЗРО, принятые при проектировании и эксплуатации;
4. Технологические и вспомогательные системы ППЗРО, важные для безопасности, управление и контроль ППЗРО;
5. Радиационная безопасность, ядерная безопасность, обращение с рао, образующимися при эксплуатации ппзро, сбросы и выбросы РВ, анализ аварий;
6. Сооружение и ввод в эксплуатацию ППЗРО, организация эксплуатации ППЗРО, пределы и условия безопасной эксплуатации. эксплуатационные пределы и условия;
7. Обеспечение качества и концептуальные положения по закрытию ППЗРО;

В данном отчёте обосновании безопасности были использованы результаты диссертационной работы Бамборина Михаила Юрьевича.

Член комиссии:

Заместитель генерального директора по  
лицензированию и разрешительной  
деятельности

ФГУП «НО РАО»

А.В. Минин

Директор департамента  
инновационного развития и технологий  
ФГУП «НО РАО»

В.Я. Красильников





Утверждаю

Генеральный директор

ООО «ИнТехПром»

Лужилкин Р.Ю.



### АКТ

#### **о внедрении технологии высокоэффективного суперпластификатора для бетона нового поколения на основе эфиров поликарбоксилатов «ReoPlast L8500»**

Данный акт составлен о том, что технологический процесс производства высокоэффективного суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов «ReoPlast L8500» (ТУ 20.59.59-004-03461300-2022) был разработан при участии Бамборина Михаила Юрьевича. В ходе производственных испытаний и внедрения технологического процесса в 2018-2022 гг. на производстве ООО «ИнТехПром», расположенного по адресу Московская обл., г. Электросталь, ул. Красная, д. 19, планируемый экономический эффект от применения суперпластификатора «ReoPlast L8500» оценивается в 2 400 000 рублей в год.

Экономист Харитонов Н. А.



Утверждаю  
Генеральный директор  
ООО «ИнТехПром»



Лужилкин Р.Ю.

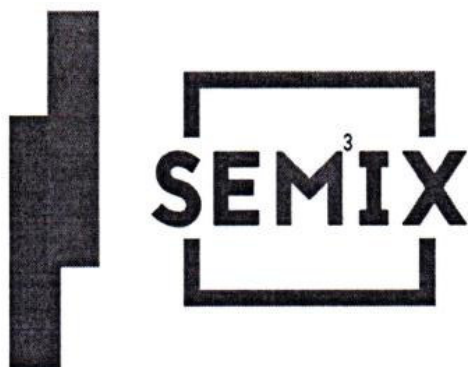
«15» марта 2023 г.

### АКТ

#### **о внедрении технологии высокоэффективного суперпластификатора для бетона нового поколения на основе эфиров полинафталинсульфонатов «ReoPlast 20S»**

Данный акт составлен о том, что технологический процесс производства суперпластификатора на основе полинафталинсульфонатов «ReoPlast 20S» (ТУ 20.59.59-002-03461300-2022) был разработан при участии Бамборина Михаила Юрьевича. В ходе производственных испытаний и внедрения технологического процесса в 2018-2022 гг. на производстве ООО «ИнТехПром», расположенного по адресу Московская обл., г. Электросталь, ул. Красная, д. 19, планируемый экономический эффект от применения суперпластификатора «ReoPlast 20S» оценивается в 1 800 000 рублей в год.

Экономист Харитонов Н. А.



115522, г. Москва  
ул. Москворечье, дом 4, корпус 5  
квартира 76  
ИНН/КПП 7724319122/772401001  
Р/С 40702810201270002872  
ООО "Банк Точка"  
БИК 044525104  
К/С 30101810745374525104  
Телефон: +7 (495) 781 59 62



**Акт**  
**от 5 июня 2023 г.**  
**о внедрении технологии производства бетонных смесей классов В30-В70**

Акт составлен о том, что в технологическом регламенте «Производство бетонных смесей классов В30-В70» были использованы результаты диссертационной работы Бамборина Михаила Юрьевича. В период с сентября по декабрь 2022 г. были проведены лабораторные и промышленные испытания смесей тяжёлого бетона вышеуказанных классов с применением высокоэффективного суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов «ReoPlast L8500» в условиях лаборатории и бетонного завода ООО «Семикс», расположенных по адресу Московская область, Ленинский р-н, д. Горки, Мемориальный пр-д, вл. 1.

Потенциальный эффект от внедрения результатов разработок определяется следующими показателями:

- производственная программа бетонно-смесительного узла – 40 м<sup>3</sup> бетонной смеси в час;
- плановая потребность в тяжёлых бетонах классов В30-В40 – 10700 м<sup>3</sup>;
- плановая потребность в тяжёлых бетонах классов В45-В70 – 4300 м<sup>3</sup>;
- снижение себестоимости 1м<sup>3</sup> бетонной смеси на 184 рубля.

Экономический эффект составляет 2 760 000 рублей.

Члены комиссии:

Начальник лаборатории

ООО «Семикс»

 Буданов И. Н.

Экономист

ООО «Семикс»

 Петрова Т. М.





115522, г. Москва  
ул. Москворечье, дом 4, корпус 5  
квартира 76  
ИНН/КПП 7724319122/772401001  
Р/С 40702810201270002872  
ООО "Банк Точка"  
БИК 044525104  
К/С 30101810745374525104  
Телефон: +7 (495) 781 59 62



**Акт**  
**от 5 июня 2023 г.**  
**о внедрении технологии производства бетонных смесей классов В7,5-В25**

Акт составлен о том, что в технологическом регламенте «Производство бетонных смесей классов В7,5-В25» были использованы результаты диссертационной работы Бамборина Михаила Юрьевича. В период с сентября по декабрь 2022 г. были проведены лабораторные и промышленные испытания смесей тяжёлого бетона вышеуказанных классов с применением суперпластификатора на основе эфиров полинафталинсульфонатов «ReoPlast 20S» в условиях лаборатории и бетонного завода ООО «Семикс», расположенных по адресу Московская область, Ленинский р-н, д. Горки, Мемориальный пр-д, вл. 1.

Потенциальный эффект от внедрения результатов разработок определяется следующими показателями:

- производственная программа бетонно-смесительного узла – 40 м<sup>3</sup> бетонной смеси в час;
- плановая потребность в тяжёлых бетонах классов В7,5-В25 – 16000 м<sup>3</sup>;
- снижение себестоимости 1м<sup>3</sup> бетонной смеси на 132 рубля.

Экономический эффект составляет 2 112 000 рублей.

Члены комиссии:

Начальник лаборатории

ООО «Семикс»

 Буданов И. Н.

Экономист

ООО «Семикс»

 Петрова Т. М.



## ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ФУНДАМЕНТСТРОЙ»

ООО «ФУНДАМЕНТСТРОЙ» 410028, Саратовская обл, Саратов г, ул. Им. Чернышевского Н.Г. д.153 офис  
1203 расчетный счет 40702810912550028922 в Филиал "Корпоративный" ПАО "СОВКОМБАНК" (г. Москва)  
ОГРН 1066450114268 ИНН 6450919677 КПП 645001001 ОКАТО 63401000000 ОГРН 1066450114268 ОКПО  
93041747

электронный адрес: [Geotech2005@yandex.ru](mailto:Geotech2005@yandex.ru)



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор  
ООО «ФУНДАМЕНТСТРОЙ»  
А.В.Корнеев

«1» июня 2023 г.

### АКТ

**о внедрении технологии применения полимерного композиционного  
трубного шпунта при выполнении работ по креплению стенок  
котлована «Очистных сооружений жилого комплекса «Авиаторов» в  
пос. Путилково Красногорский район»**

Акт составлен в том, что в Рабочей документации «Крепление стенок котлована «Очистных сооружений жилого комплекса «Авиаторов» в пос. Путилково Красногорский район» №154 расположенной по адресу Московская область, Красногорский район, пос. Путилково, ул.Просторная д.14А были использованы результаты диссертационной работы Бамборина Михаила Юрьевича.

На данном объекте было укреплено 767 м<sup>2</sup> котлована, эффект от применения шпунтового крепления стен котлована с применением полимерных композиционных трубных шпунтов составил 6 133 957,00 руб.

Члены комиссии:

Руководитель проектного отдела  
ООО «Фундаментстрой»

\_\_\_\_\_ Собошкин Р.В.

Главный инженер проекта  
ООО «Фундаментстрой»

\_\_\_\_\_ Вяльшин Д.Р.

Заместитель генерального директора  
по экономике и финансам  
ООО «Фундаментстрой»

\_\_\_\_\_ Чесноков Г.В.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ФГБУ «Гидроспецгеология»

А.А. Анненков

2023 г.

## АКТ

**внедрения результатов научно-исследовательской работы по теме «Выполнение дополнительных прогнозных расчётов оценки долговременной безопасности ППЗРО 3, 4 классов (Озерский городской округ, Челябинская область).**

Комиссия в составе:

председатель – заместителя генерального директора по производству А.В.Глаголев;

члены: – директор Управления ОМСН С.В.Святовец;

– начальник отдела математического моделирования А.А.Куваев

– главный специалист отдела математического моделирования

Н.А.Анисимов

составила настоящий акт о том, что гидрогеологическая модель, прогнозные расчёты оценки долговременной безопасности ППЗРО 3, 4 классов ФГУП «НО РАО» филиал Озёрский разработаны по договору от 17.12.2021 №319/3482-Д между ФГУП «НО РАО» и ФГБУ «Гидроспецгеология».

Комиссия установила следующее:

1. Сбор и анализ материалов, содержащих необходимые для реализации геофильтрационной-геомиграционной модели параметры ППЗРО;
2. Выполнение параметризации модели на основе информации о геолого-гидрогеологических условиях района размещения;
3. Выполнение прогнозных расчётов выхода нуклидов за пределы ППЗРО и оценка ядерной безопасности для периода после закрытия ППЗРО по разработанным сценариям на созданной модели выполнены при участии Бамборина Михаила Юрьевича.

Члены комиссии:

А.В. Глаголев

С.В. Святовец

А.А. Куваев

Н.А. Анисимов