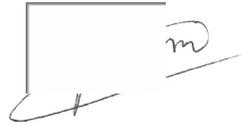


*На правах рукописи*



**ТРАВИН Сергей Михайлович**

**СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ХРАНИЛИЩ  
ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Белаш Татьяна Александровна**

Официальные оппоненты: **Альберт Июля Ушерович**  
доктор технических наук,  
АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»,  
отдел «Статика и сейсмостойкость бетонных  
и железобетонных сооружений», ведущий  
научный сотрудник;

**Долгая Анжелика Александровна**  
кандидат технических наук, АО «Трансмост»,  
сектор разработки программных средств,  
инженер-проектировщик I категории.

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский центр  
«Строительство» (г. Москва).

Защита состоится «10» июня 2021 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса).

Тел./факс: 8 (812) 316-58-72; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal//travin-sergey-mihaylovich>.

Автореферат разослан «05» мая 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Попов Владимир Миревич

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с Федеральным законом «Об использовании атомной энергии» в Российской Федерации основными принципами правового регулирования в области использования атомной энергии являются: обеспечение безопасности при использовании атомной энергии – защита отдельных лиц, населения и окружающей среды от радиационной опасности.

После извлечения из реактора отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) излучает смертельные дозы радиации, таким образом, безопасное хранение ОЯТ является важным вопросом, актуальность которого не подлежит сомнению. При этом в настоящее время существует проблема продления ресурса действующих отдельно стоящих «мокрых» хранилищ ОЯТ (ХОЯТ), в процессе решения которой возникает задача обоснования их безопасности при более интенсивных экстремальных внешних воздействиях, чем принимались при проектировании. Риск возникновения техногенных воздействий, таких как падение самолета или воздействие воздушной ударной волны можно свести к минимуму с помощью запрета полетов вблизи площадки размещения ХОЯТ или отнесением на безопасное расстояние взрывоопасных объектов, в то время как сейсмическое воздействие носит непредсказуемый, случайный характер и его никак нельзя предотвратить.

Таким образом, существует необходимость продления безопасной эксплуатации действующих «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ в соответствии с актуальными нормативными требованиями к их сейсмостойкости, с учётом текущего технического состояния.

Работа посвящена решению обозначенных проблем, что и определяет ее актуальность.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемы безопасности радиационно-опасных объектов, в частности вопросы обеспечения прочности их строительных конструкций и работоспособности технологического оборудования при землетрясениях и других экстремальных внешних воздействиях, рассмотрены в работах ряда авторов: С.Б. Архипова, В.С. Беляева, А.Н. Бирбраера, С.Е. Бугаенко, С.Л. Буторина, А.С. Дмитриева, И.В. Калиберды, М.В. Караковского, А. П. Кириллова, А.В. Петренко, А.И. Попова, А.Ю. Роледера, А.Е. Саргсяна, Б.В. Цейтлина, Г.С. Шульмана, С.Г. Шульмана, J. Bauer, K. Drittler, P. Gruner, J.D. Riera, F. Scharpf, G.J. Schuëller, R. Schwarz, H. Shibata, J.D. Stevenson, P. Varpassuo, N.F. Zorn и др.

При этом авторы часто освещают общие вопросы безопасности атомных электростанций (АЭС), а вопросы устойчивости строительных конструкций к землетрясениям и другим экстремальным внешним воздействиям

рассматриваются только для проектируемых объектов, главным образом для зданий и сооружений ядерного острова.

Ряд авторов, работы которых связаны с тематикой хранения ОЯТ, рассматривают безопасность хранилищ в основном с технологической точки зрения, не касаясь вопросов несущей способности строительных конструкций при сейсмическом воздействии. К этим авторам относятся: И.А. Андрюшин, А.Н. Балицкая, В.И. Калинин, В.Г. Крицкий, Т.Ф. Макаручук, М.В. Радченко, Н.В. Размашкин, А.Л. Серова, В.Т. Сорокин, Н.С. Тихонов, А.И. Токаренко, Ю.А. Юдин и другие.

Таким образом, до сих пор в научных изданиях теме устойчивости эксплуатируемых отдельно стоящих ХОЯТ к землетрясениям не было уделено достаточно внимания.

**Целью исследования** является оценка сейсмостойкости эксплуатируемых, отдельно стоящих хранилищ отработавшего топлива, учитывая их конструктивные и эксплуатационные особенности с разработкой практических рекомендаций по продлению безопасного функционирования этих объектов.

**В задачи исследования входило:**

1. Выполнить анализ работ в области сейсмостойкости строительных конструкций объектов использования атомной энергии, как в России, так и за рубежом, включая оценку конструктивных решений сооружений для хранения отработавшего ядерного топлива. На основе анализа выбрать тип хранилищ, представляющий наибольшую потенциальную опасность для людей и окружающей среды в случае сейсмического воздействия.

2. Разработать научно обоснованную методологию системного и многофакторного обоснования сейсмостойкости длительно эксплуатируемых «мокрых» ХОЯТ с учетом наиболее вероятного сценария отказа строительных конструкций при сейсмических воздействиях.

3. С учетом разработанной методологии провести расчетно-теоретический анализ безопасности функционирования эксплуатируемых строительных конструкций отдельно стоящих «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива при сейсмических воздействиях.

4. Рассмотреть варианты сейсмоусиления поврежденных строительных конструкций эксплуатируемых хранилищ отработавшего ядерного топлива и выполнить расчетные оценки предлагаемых решений.

5. Предложить конструктивные мероприятия, позволяющие повысить сейсмостойкость эксплуатируемых хранилищ отработавшего ядерного топлива наиболее опасного типа.

**Объектом исследования** являются строительные конструкции эксплуатируемых отдельно стоящих «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива.

**Предметом исследования** является оценка сейсмостойкости строительных конструкций эксплуатируемых отдельно стоящих «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Разработана научная методология системного и многофакторного обоснования сейсмостойкости длительно эксплуатируемых «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ, основанная на построении наиболее вероятного сценария отказа строительных конструкций при сейсмических воздействиях;

2. Дана расчетно-теоретическая оценка безопасности функционирования эксплуатируемых «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ при сейсмических воздействиях различного вида;

3. Установлены особенности влияния свойств грунтового основания, частотного состава сейсмического воздействия, расположения и количества находящегося на хранении отработавшего топлива, а также конструктивных решений эксплуатируемых строительных конструкций «мокрых» хранилищ на их сейсмостойкость;

4. Показана необходимость учета возможных повреждений различного рода в строительных конструкциях эксплуатируемых «мокрых» хранилищ для объективной оценки их напряженно-деформированного состояния;

5. Предложены и исследованы различные технические решения по повышению сейсмостойкости строительных конструкций эксплуатируемых «мокрых» хранилищ ОЯТ, обеспечивающие их прочность и устойчивость во время сейсмических воздействий;

6. Предложено конструктивное решение стен и покрытий большого пролета для «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива, повышающее сейсмостойкость сооружений данного типа;

7. Изучено влияние укрепления грунтов основания на сейсмостойкость строительных конструкций «мокрых» ХОЯТ.

**Теоретическая значимость** заключается в объективной оценке состояния эксплуатируемых строительных конструкций «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива во время землетрясений с учетом наиболее вероятного сценария отказа строительных конструкций на основе математического моделирования процессов, происходящих внутри и снаружи рассматриваемого объекта.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что полученные результаты позволяют обоснованно предусматривать комплекс мероприятий по повышению сейсмостойкости эксплуатируемых «мокрых» отдельно стоящих хранилищ отработавшего ядерного топлива и продлить срок их эксплуатации, а также указывают на слабые

места в строительных конструкциях, что позволяет эксплуатирующим организациям осуществлять более качественный мониторинг за состоянием сооружений.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО ПГУПС при подготовке специалистов и магистров по направлению «Строительство». Кроме того, прилагается справка о внедрении (№ 200-СПБФ-230-7 от 24.09.2019) результата настоящих диссертационных исследований в АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – «ВНИПИЭТ».

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач достигалось путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов с последующим анализом колебаний и напряженно-деформированного состояния строительных конструкций выбранного типа ХОЯТ на основе детальных пространственных моделей при сейсмических воздействиях.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, направление соответствует п. 2 паспорта специальности: «Обоснование, разработка и оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, экономической и конструкционной безопасности на основе математического моделирования с использованием автоматизированных средств исследований и проектирования».

**Достоверность и обоснованность результатов исследований** обеспечивается использованием нормативных данных, применением обоснованных методов и методик, разработанных отечественными и зарубежными учеными, занимающимися вопросами обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии и сейсмостойкости зданий и сооружений, сопоставлением результатов с данными, полученными другими авторами, а также применением надежных и апробированных вычислительных программ, и методов моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методология системного и многофакторного обоснования сейсмостойкости длительно эксплуатируемых конструкций «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ, с учетом наиболее вероятного сценария отказа строительных конструкций при сейсмических воздействиях.

2. Результаты расчетно-теоретического анализа сейсмостойкости, выполненного на основании предложенной методологии.

3. Обоснование необходимости учета трещин и повреждений в эксплуатируемых конструкциях «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ при оценке их сейсмостойкости.

4. Рекомендации по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости эксплуатируемых строительных конструкций «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива.

#### **Апробация результатов**

Результаты исследований докладывались на конференциях

- Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2010», Москва, Российский университет дружбы народов, 6–9 апреля 2010 г.;

- Всеукраинской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы современного железобетона». г. Ровно, 28 мая по 31 мая 2013г.;

- XIX научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». Санкт-Петербург, ВИТУ, 19 марта 2015 г.;

- Научно-методической конференции, посвященной 150-летию кафедры «Здания», ФГБОУ ВПО ПГУПС, Санкт-Петербург, 25–26 мая 2015 г.;

- XI Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Сочи, 24–28 августа 2015 г.;

- Научно-практической конференции по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Москва, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 1–2 декабря 2016 г.;

- Научно-методической конференции, посвященной 155-летию кафедры «Здания», ФГБОУ ВПО ПГУПС, Санкт-Петербург, 17 апреля 2019 г.;

- Научном семинаре, посвященном 110-летию со дня рождения профессора О.А. Савинова, 3–6 февраля 2020 года, г. Санкт-Петербург.

Международной научно – технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность" ICCATS 2020, 6–12 сентября 2020 года, г. Сочи.

**Публикации:** Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в том числе 7 по списку ВАК и 1 Scopus.

#### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, основные результаты и выводы, список литературы из 91 источника. Объем диссертационного исследования составляет 153 страницы машинописного текста, в данный объем входят 127 страницы основного текста, содержащих 98 рисунков и 25 таблиц.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, которые составляют научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

В *первой главе* на основании литературных источников, так или иначе затрагивающих изучаемую проблему, изложено состояние изучаемого вопроса, выполнен обзор конструктивных решений ХОЯТ, выявлен тип хранилищ, являющийся наиболее уязвимым к землетрясению. Рассмотрены факторы, влияющие на интенсивность колебаний строительных конструкций при землетрясении, оценено влияние повреждений на сейсмостойкость строительных конструкций, сделан обзор существующих подходов и требований к обеспечению прочности строительных конструкций ХОЯТ.

При изучении отечественной и зарубежной литературы было выявлено, что во всем мире проблемой «мокрых» ХОЯТ являются утечки радиоактивной воды, что в свою очередь свидетельствует о наличии повреждений в их строительных конструкциях. Например, в США только в период с 1981 по 1996 годы официально зарегистрировано 56 аварий, связанных потерями воды из «мокрых» ХОЯТ. Одна из самых обсуждаемых и скандальных из них произошла в 2005 году на втором энергоблоке АЭС IndianPoint, расположенной вблизи от Нью-Йорка.

В настоящее время отработавшее ядерное топливо реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, РБМК-1000 и т. п. не перерабатывается в промышленных масштабах, поэтому осуществляется его временное хранение в специальных сооружениях. Конструктивные решения подобных хранилищ разнообразны.

Существуют различные вариации контейнерных и камерных (см. рис. 1) хранилищ, в которых используют «сухую» технологию хранения (охлаждение ОЯТ осуществляется путем естественной или принудительной конвекции воздуха). Такие хранилища, как правило, рассчитаны на все виды экстремальных внешних воздействий.

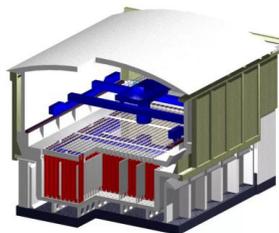


Рисунок 1. — Пример «сухого» контейнерного и «сухого» камерного ХОЯТ

Существуют также приреакторные бассейны выдержки, находящиеся в здании реактора в непосредственной близости от энергетической установки. Безопасность таких хранилищ достигается совместно с безопасностью самого реактора, последствия потенциальной аварии которого являются более тяжелыми.

По мере накопления ОЯТ приреакторные бассейны становятся неспособны вмещать объем накопившегося топлива. По этой причине были спроектированы отдельно стоящие «мокрые» хранилища (см. рис.2), по сути являющиеся тиражированием приреакторных, но способные вмещать гораздо больший объем ОЯТ. Такие хранилища есть практически на каждой российской АЭС, а также на территории специализированных предприятий.

Так как подобные хранилища были спроектированы много лет назад, до вступления в силу современных норм, они не были рассчитаны на все требуемые виды экстремальных внешних воздействий.

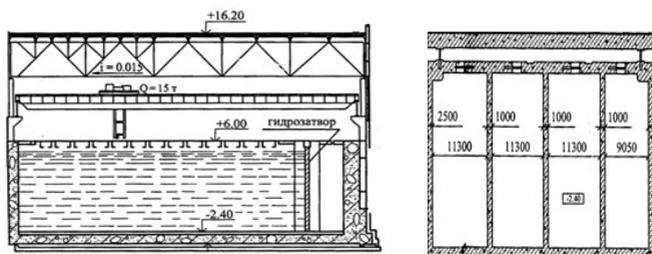


Рисунок 2. Поперечный разрез и план отсека хранения характерного отдельно стоящего «мокрого» ХОЯТ

Конструктивное решение характерного отдельно стоящего «мокрого» ХОЯТ комбинированное, используются монолитные железобетонные, сборные железобетонные, а также стальные конструкции.

На основании обзора конструктивных решений эксплуатируемых типов ХОЯТ было установлено, что достаточно большая часть «мокрых» отдельно стоящих хранилищ была запроектирована без учета сейсмических воздействий. Приведенные выше цели и задачи исследования определялись с учетом данного вывода.

**Во второй главе** была разработана научно обоснованная методология системного и многофакторного обоснования сейсмостойкости длительно эксплуатируемых «мокрых» ХОЯТ.

Главной конструктивной особенностью отдельно стоящих «мокрых» ХОЯТ является их нерегулярная структура, а именно наличие жесткой нижней части из монолитного железобетона и ярко выраженной каркасной гибкой верхней части.

На первом этапе был выполнен анализ основного набора возможных рисков, связанных с землетрясением на площадке размещения «мокрого» ХОЯТ, построено «дерево отказов» (см. рис. 3), рассмотрены отказы различных элементов строительных конструкций, внутренней облицовки и основания.

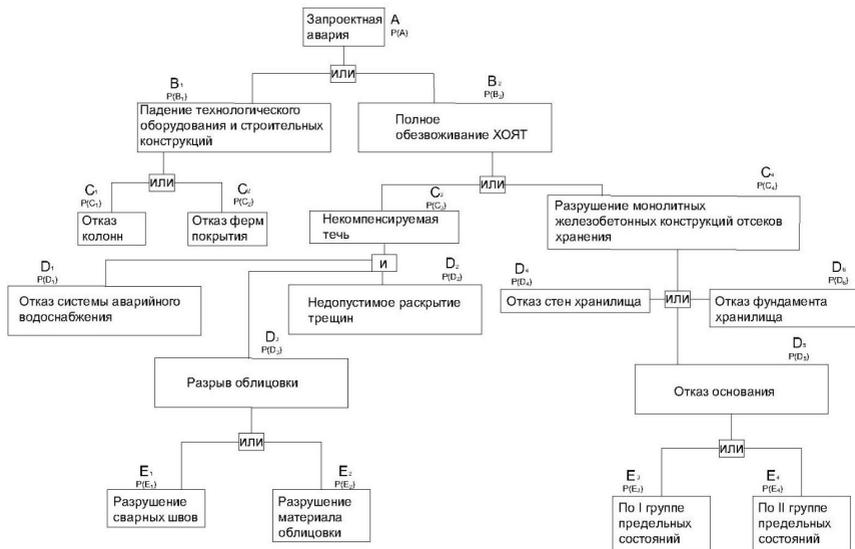


Рисунок 3. «Дерево отказов» «мокрого» отдельно стоящего ХОЯТ при сейсмическом воздействии (А-головное событие; P(A) - вероятность головного события; B<sub>1</sub>; C<sub>1</sub>; D<sub>1</sub>; E<sub>1</sub> – базовые отказы; P (B<sub>1</sub>; C<sub>1</sub>; D<sub>1</sub>; E<sub>1</sub>) – вероятности базовых отказов)

Анализ «дерева отказов» и количественная оценка показали, что наиболее вероятным сценарием развития запроектной аварии в случае землетрясения является падение технологического оборудования и строительных конструкций на перекрытие отсеков хранения или хранимое ЯТ. Кроме того был выполнен обзор последствий сильных землетрясений, который показал, что сооружения с перепадами жесткости получали существенные повреждения. Такие повреждения, как правило, наблюдались именно в областях перехода от жестких конструкций сооружений к их гибким частям.

Таким образом, на основе анализа последствий сильных землетрясений, а также проведенных расчетных оценок, был сделан вывод, что в силу конструктивного исполнения наиболее вероятным сценарием отказа строительных конструкций «мокрых» ХОЯТ при сейсмических воздействиях является обрушение гибкой части сооружения и мостовых кранов, установленных на ней. Это в свою очередь может привести к пробою облицовки, осушению бассейнов выдержки и полному обезвоживанию хранилища.

Было выявлено, что при рассматриваемой конструктивной схеме основными факторами, влияющими на сейсмостойкость строительных конструкций являются: грунтовые условия, наличие ОЯТ и его распределение в хранилище, частотный состав сейсмического воздействия, объемно - планировочное и конструктивное решение нижней части сооружения, а также возможное наличие в ней повреждений.

Для оценки влияния перечисленных выше факторов на сейсмостойкость «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ были проведены расчетно-теоретические исследования.

С помощью программных средств Abaqus и SCAD созданы пространственные расчетные конечно-элементные модели (см. рис. 4) отсека хранения эксплуатируемого «мокрого» ХОЯТ, разрез и план которого приведены на рисунке 2. Модели выполнены с применением конечных элементов «оболочка», «пространственный стержень», «пружина» и учитывают геометрию, свойства материалов, а также все климатические, эксплуатационные нагрузки и сейсмическое воздействие.

Все сопряжения железобетонных элементов жесткие, стальные фермы шарнирно примыкают к верхней части колонн.

Железобетонные элементы выполнены из бетона класса В25 и арматуры А-400. Их толщины и сечения приняты:

- днище и поперечные стены – 1000 мм;
- наружная стена транспортного коридора – 1500 мм;
- внутренняя стена транспортного коридора – 2000 мм;
- наружная стена отсеков хранения – 1100 мм;
- колонны – 400×400 мм.

Металлические конструкции выполнены из уголков, класс стали С255. Размер модели в плане 48×30 м.

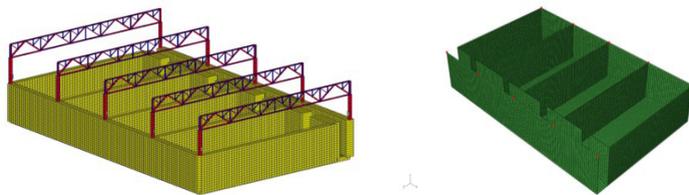


Рисунок 4. Фрагменты расчетных моделей отсека хранения эксплуатируемого «мокрого» ХОЯТ слева – SCAD, справа – Abaqus

Так как наиболее уязвимой и вносящей незначительный вклад в общую жесткость сооружения частью хранилища является его гибкий каркас – для исключения влияния упругих деформаций на данном этапе исследования строительным конструкциям нижней части сооружения был назначен

повышенный модуль Юнга. В дальнейшем, на основе результатов вычисления поэтажных спектров ответа в точках крепления колонн, оценивалась интенсивность колебаний и напряжения несущей рамы сооружения.

Землетрясение интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64 задавалось в виде трехкомпонентных акселерограмм. Использовалась как синтезированная запись, соответствующая нормативному широкополосному спектру ответа (НП-031-01), так и записи реальных землетрясений (высокочастотного и низкочастотного) из базы сильных землетрясений Европы.

Грунтовое основание учитывалось на основе модели, состоящей из пружин и демпферов, гидродинамический эффект – согласно методике, при которой жидкость задается в виде двух масс: кинематической  $m_1$  и инерционной  $m_2$  (см. рис. 5).

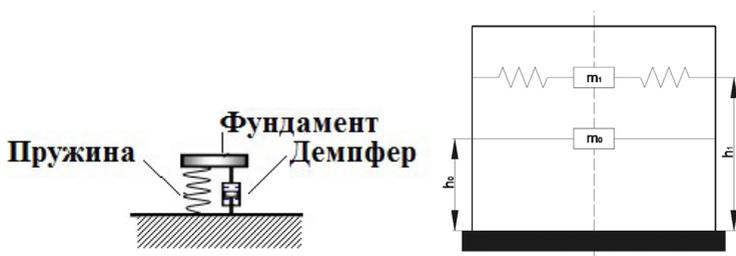


Рисунок 5. Методики учета грунтового основания и гидродинамического эффекта

Численные значения жесткостей основания вычислялась по формулам МР1.5.2.05.999.0025-2011 «Нормы проектирования атомных станций на сейсмостойкость» (ниже приведены формулы для горизонтального и вертикального поступательного движения).

$$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}; \quad (1)$$

$$k_z = \frac{4G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)}, \quad (2)$$

где:  $k_x$  и  $k_z$  – коэффициенты жесткости основания;  $G$  – динамический модуль сдвига грунта основания;  $L_x$  и  $L_y$  – размеры прямоугольной фундаментной плиты,  $\mu$  – коэффициент Пуассона грунта основания.

Расчеты выполнялись динамическим методом (модальной суперпозиции) с заданием демпфирования по формам колебаний.

При этом уравнение колебаний в матричной форме записывается в виде:

$$M\ddot{Y} + R\dot{Y} + BY = -M\ddot{Y}_0, \quad (3)$$

где:  $M$  – диагональная матрица инерции;  $B$  – матрица демпфирования;  $R$  – матрица жесткости;  $Y_0$  – вектор кинематического возмущения.

*Варьирование частотного состава исходного сейсмического воздействия*

Расчеты на высокочастотное и низкочастотное (см. рис. 6) воздействие из базы сильных землетрясений Европы производились на мягком ( $E = 5$  МПа) и жестком ( $E = 53$  МПа) грунтах.

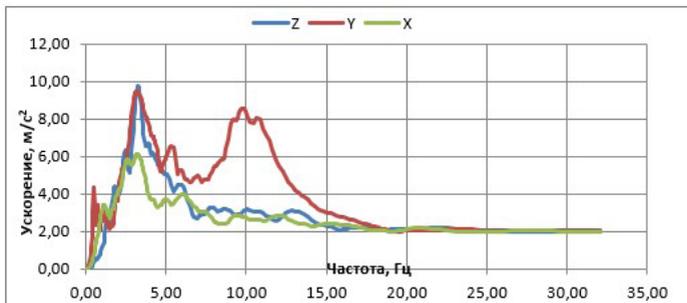


Рисунок 6 – Спектры ответа, соответствующие компонентам низкочастотного воздействия (демпфирование 5%)

Для хранилища наиболее неблагоприятной ситуацией оказалось сочетание низкочастотного воздействия и мягкого грунта. В этом случае ответные ускорения оказались в 3 раза интенсивнее, чем при таком же воздействии на жестком грунте и в несколько десятков раз интенсивнее, чем в случае сочетания мягкого грунта и высокочастотного воздействия (см. рис. 7).

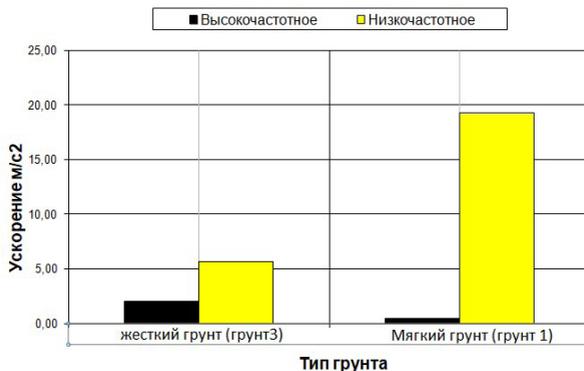


Рисунок 7. Ответные вертикальные ускорения рам каркаса при различной жесткости грунта и частоте исходного сейсмического воздействия

### Варьирование жесткости грунтового основания

Рассматривалось пять типов основания: от слабого до несжимаемого скального. Характеристики рассмотренных типов грунта приведены ниже в табл. 1. Сейсмическое воздействие задавалось в виде синтезированной трехкомпонентной акселерограммы, соответствующей графику НП-031-01.

**Таблица 1. Характеристики грунтового основания принятые в исследовании**

Тип грунта	Приблизительное значение модуля деформации, $E$ (МПа)	Модуль сдвига, $G$ (Н/м <sup>2</sup> )	Плотность, $\rho$ (т/м <sup>3</sup> )	Коэффициент Пуассона, $\mu$
Грунт 1	5	$6,5 \times 10^7$	2	0,4
Грунт 2	16	$2,16 \times 10^8$	2	0,4
Грунт 3	53	$7,2 \times 10^8$	2	0,4
Грунт 4	177	$2,4 \times 10^9$	2	0,4
Скала	–	$\infty$	–	0,4

Были построены поэтажные спектры ответа (ПСО) в точках крепления колонн каркаса (см. рис. 8) к тяжелой монолитной нижней части сооружения, на основе которых получен график ответных ускорений рам каркаса в зависимости от жесткости грунта (см. рис. 9).

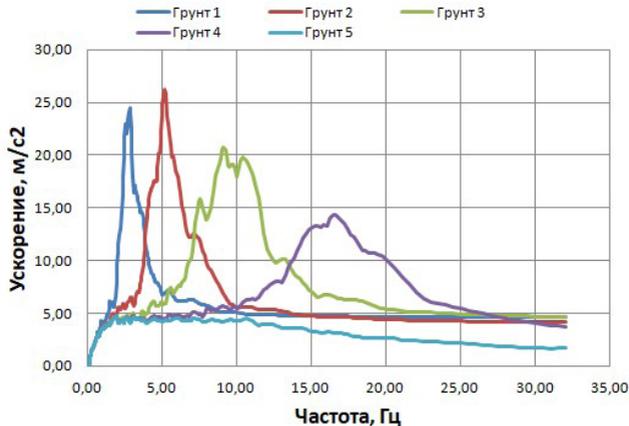


Рисунок 8. Вертикальные ПСО в точках крепления колонн каркаса в зависимости от жесткости грунта (демпфирование 5%)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что жесткость грунтового основания до определенного момента оказывает существенное влияние на НДС гибкой части сооружения, вызванного вертикальной компонентой землетрясения, в то время как в горизонтальном направлении влияния практически нет. Это объясняется очень низкой определяющей частотой собственных колебаний рам в поперечном направлении.

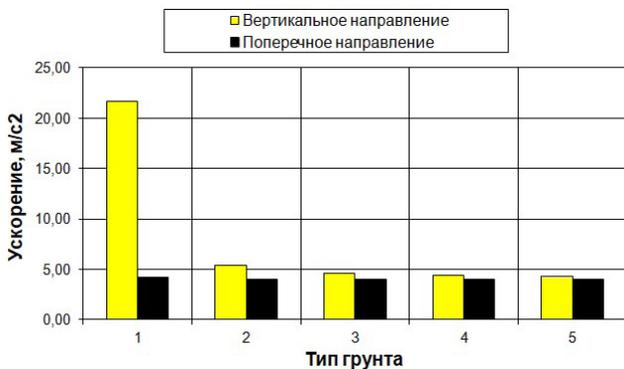


Рисунок 9. График ответных ускорений рам каркаса в зависимости от жесткости грунта

Ниже, на рисунке 10 приведены продольные силы в элементах несущей рамы, вызванные вертикальным сейсмическим откликом при наиболее мягком (грунт 1) и втором по жесткости (грунт 2) грунте.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в данном случае существенно снизить сейсмические усилия в элементах хранилища, тем самым повысив его сейсмостойкость, может укрепление грунта.

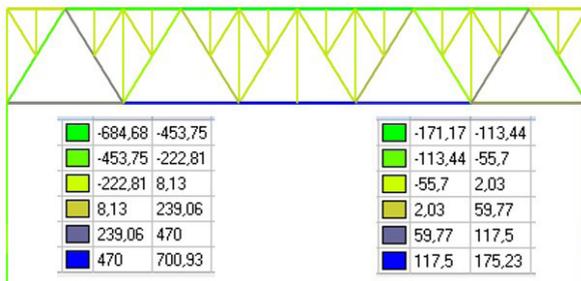


Рисунок 10. Продольные сейсмические силы в элементах рамы при наиболее мягком (слева) и втором (справа) по жесткости грунте, т.

### *Варьирование загруженности хранилища*

На протяжении эксплуатации ХОЯТ изменяется количество отработавшего топлива, находящегося на хранении. При этом ОЯТ составляет существенную часть от общей массы сооружения.

Таким образом, наполненность хранилища должна оказывать влияние на колебания строительных конструкций и на возникающие в них усилия при сейсмическом воздействии.

Были рассмотрены варианты полной загрузки хранилища, загруженности на три четверти, на половину, на одну четвертую, а также вариант полного отсутствия топлива. При этом считалось, что топливо распределено равномерно, а сооружение опирается на слабый грунт (грунт 1). Сейсмическое воздействие соответствует синтезированному широкополосному спектру ответа на грунте.

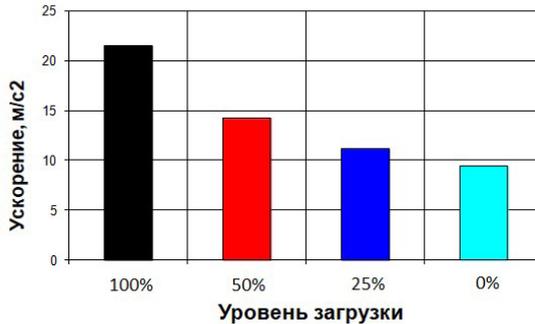


Рисунок 11. Ответные вертикальные ускорения каркасной части в зависимости от загруженности хранилища

Таким образом, ответные вертикальные ускорения каркаса при землетрясении и полной загрузке хранилища могут в 1,5 раз превосходить ускорения при полупустом хранилище и более чем в 2 раза при незаполненном, что соответствующим образом сказывается на усилиях, возникающих в конструкции (см. рис. 12).

Загруженность хранилища оказала заметное влияние на частоты определяющих форм колебаний его строительных конструкций, а также на ответные ускорения каркасной части (см. рис. 11) и, соответственно, на усилия в ней. На предыдущем этапе исследования было показано, что горизонтальные ускорения рамы практически не меняются при изменении частоты колебаний нижней части сооружения, поэтому приведены только результаты для вертикального направления.



Рисунок 12. Продольные сейсмические силы в элементах рамы при полностью загруженном (слева) и при пустом (справа) хранилище, т.

### *Варьирование распределения ОЯТ в хранилище*

Далее варьировалось распределение одинакового (25 % от максимума) количества ОЯТ в хранилище (см. рис. 13). Учитывался мягкий грунт (грунт 1) и сейсмическое воздействие по НП-031-01.

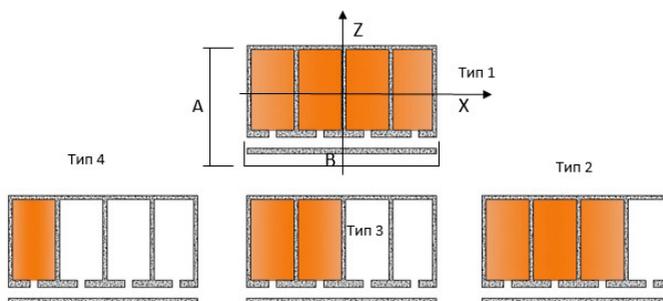


Рисунок 13. Варианты распределения ОЯТ в хранилище

Оказалось, что распределение топлива в хранилище также влияет на сейсмический отклик каркаса сооружения, хотя и незначительно. Разница между типом загрузки 1 и 4 оказалась около 20 % (см. рис. 14).

Таким образом, мерой по повышению сейсмостойкости «мокрых» ХОЯТ на слабых грунтах может стать цементация грунта основания, а также контроль со стороны эксплуатирующей организации за наполненностью хранилища и равномерным распределением ОЯТ в отсеках хранения. При этом особое внимание стоит уделить сооружениям, на площадках размещения которых реализуются низкочастотные землетрясения, так как такие воздействия представляют наибольшую потенциальную опасность для рассматриваемых объектов.

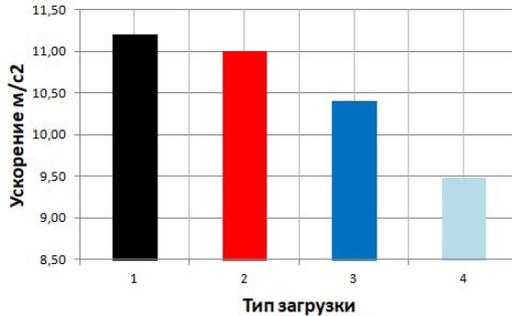


Рисунок 14. Ответные вертикальные ускорения каркаса в зависимости от распределения топлива в хранилище

В **третьей главе** особое внимание уделено важности учета и повреждений в строительных конструкциях, что является одним из составляющих многофакторного анализа сейсмостойкости.

Было исследовано влияние возможного наличия повреждений на устойчивость строительных конструкций хранилища отработавшего ядерного топлива к землетрясению. Предложены варианты сейсмоусиления сооружения. Использовались записи землетрясения интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64, соответствующие спектру ответа на грунте по НП-031-01. Особое внимание уделено наличию повреждений в нижней части хранилища.

При выполнении исследования учитывались данные натуральных наблюдений за состоянием строительных конструкций ХОЯТ, взятые из практики эксплуатации подобных сооружений. Задача была разбита на несколько этапов. На первом подбиралась статическая жесткость грунтового основания таким образом, чтобы осадка сооружения соответствовала фактической. Затем был произведен расчет прочности хранилища (общий вид расчетной модели приведен на рис. 4) и определена зона, в которой происходило массовое образование и раскрытие трещин. Эта зона оказалась расположена на фундаментной плите, вдоль внутренней продольной стены сооружения (см. рис. 15). Образование трещин сопровождалось отклонением наружной стены от вертикального положения.

Затем были определены дополнительные усилия в верхней части сооружения, вызванные перемещением стены (см. рис. 16).

Полученные усилия не оказались существенными и не вызвали обрушения.

Далее была выполнена оценка влияния остаточных трещин и повреждений на напряженное состояние элементов отсеков хранения (фундаментной плиты, продольных и поперечных стен) при сейсмическом воздействии и статических нагрузках.

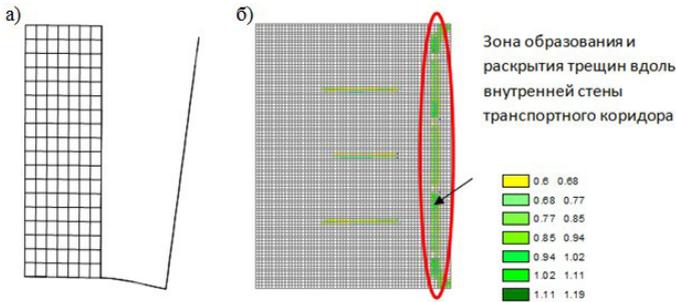


Рисунок 15. Зона образования и раскрытия трещин в фундаментной плите (мм) и отклонение наружной стены от вертикального положения

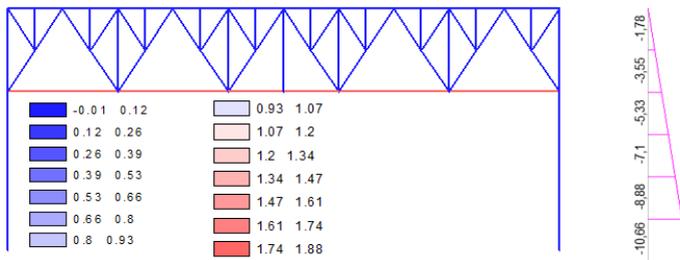


Рисунок 16 – Продольные усилия в элементах рамы ( $\tau$ ) и изгибающие моменты в колонне ( $TxM$ ) от перемещения опоры при статических нагрузках

На рисунке 17 представлены результаты сопоставления максимальных изгибающих моментов в наружной консольной стене при различной степени трещинообразования.

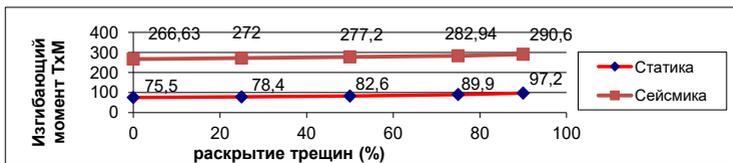


Рисунок 17 – Значения максимальных изгибающих моментов в наружной консольной стене

В рассмотренной стене происходило увеличение максимального изгибающего момента с развитием остаточных трещин в фундаментной плите, как при статическом, так и при сейсмическом воздействии. Подобная картина наблюдалась в фундаментной плите и поперечных стенах.

Во внутренних продольных стенах произошло снижение максимального изгибающего момента как при статической нагрузке, так и при сейсмической, причем при сейсмике снижение оказалось более весомым (см. рис. 18).

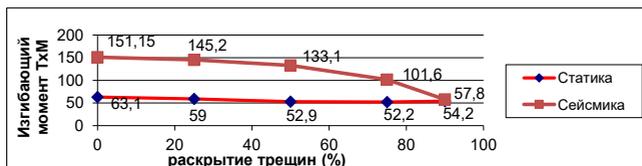


Рисунок 18 – Значения максимальных изгибающих моментов во внутренней продольной стене

В целом, появление остаточной трещины привело к изменению напряженного состояния всех элементов рассматриваемой конструкции, как при статической, так и при сейсмической нагрузке.

Оценка сейсмостойкости сооружения с учетом зоны трещинообразования показала, что отказ произойдет по причине обрушения каркасной части сооружения. Это будет являться следствием дополнительного (сейсмического) горизонтального перемещения наружной консольной стены на 92 мм. На рисунке 19 представлена определяющая форма колебаний нижней части сооружения, наглядно демонстрирующая, каким образом происходит отклонение стены, на которую опирается колонна каркаса.

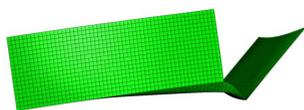


Рисунок 19 – Определяющая форма колебаний сооружения в поперечном направлении

Ниже, на рисунке 20 приведены значения усилий, возникающие при этом в поперечной раме.

Смещение стены вызывает существенные изгибающие моменты в колоннах, при этом, благодаря шарнирному сопряжению, в фермах значительных усилий не наблюдается.

Максимальные суммарные (от всех действующих на сооружение нагрузок) усилия в колонне:  $N = 124$  т;  $M_y = 24,8$  т\*м;  $Q_z = 3,3$  т. В таблице 2 приведены результаты расчета прочности колонны по наиболее исчерпавшим запас критериям.

Таблица 2. Результаты расчета прочности колонны

Проверка	Коэффициент использования
Прочность по предельному моменту сечения	1,257
Деформации в сжатом бетоне	2,129

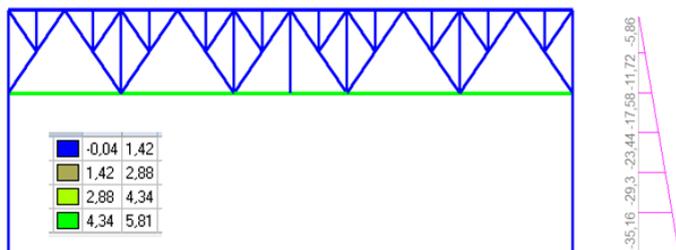


Рисунок 20 – Продольные усилия в элементах рамы (т) и изгибающие моменты в колонне (тхм) от суммарного (статического и сейсмического) смещения консольной стены

Далее были рассмотрены варианты усиления монолитной части сооружения, направленные на ограничение сейсмических перемещений консольной стены. Было рассмотрено 4 варианта, приведенных в таблице 3 и на рисунке 21.

**Таблица 3. Рассмотренные варианты усиления**

Вариант 1	установка поперечных железобетонных ребер жесткости на фундаментную плиту в зоне транспортного коридора; шаг ребер – 4 м; толщина и высота – 1 м;
Вариант 2	установка железобетонных контрфорсов на естественном основании; шаг контрфорсов – 6 м; толщина – 2 м; ширина – 3 м; высота соответствует высоте консольной стены.
Вариант 3	установка аналогичных железобетонных контрфорсов на свайном основании
Вариант 4	раскрепление консольной стены железобетонными перемычками сверху; шаг перемычек – 12 м; ширина 1 м, толщина 0,2 м.

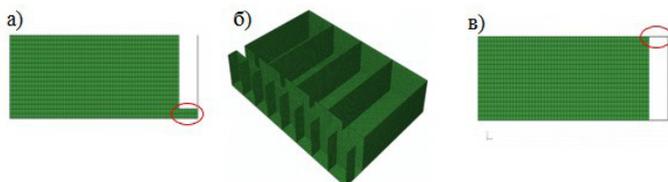


Рисунок 21 – Расчетные модели с учетом усиления:  
а – вариант 1; б – варианты 2 и 3; в – вариант 4

Вариант усиления перемычками оказался наиболее рациональным. Максимальное горизонтальное сейсмическое перемещение стены при этом

составило 1 мм, в то время, как варианты 1, 2 и 3 показали результаты 25 мм; 63 мм и 38 мм соответственно.

Так как в силу эксплуатационных особенностей сооружения невозможно установить стационарные перемычки, было разработано устройство замкового типа, которое при необходимости возможно привести в разомкнутое состояние и не создавать помех при эксплуатации хранилища (подана заявка на изобретение).

Так как падение каркасной части сооружения является наиболее вероятным сценарием развития запроектной аварии на «мокрых» ХОЯТ, в четвертой главе рассматривалась возможность замены каркаса на монолитные железобетонные конструкции и производились необходимые при этом расчетные оценки.

В *четвертой главе* были рассмотрены варианты повышения сейсмостойкости «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ, а именно подобрано рациональное конструктивное исполнение монолитных железобетонных конструкций, заменяющих каркасную часть сооружения, выполнена оценка особенностей поведения строительных конструкций в случае усиления грунтов основания.

*Выбор рационального конструктивного исполнения монолитных железобетонных конструкций заменяющих каркасную часть сооружения*

На первом этапе были выполнены расчеты прочности строительных конструкций, заменяющих каркасную часть ХОЯТ (большепролетной плиты покрытия (взамен ферм покрытия и сборных плит) и наружных стен (взамен колонн)) при землетрясении интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64 и других экстремальных внешних воздействиях природного и техногенного происхождения.

Создана прямоугольная в плане модель, изображающая новые конструкции над центральным залом ХОЯТ (замена каркасного верха). Размеры в плане приняты 40×20 м, высота 15 м. В уровне нижних узлов расчетной схемы принята жесткая заделка. Толщина стен и покрытия 500 мм. Ниже, на рисунке 22 приведены полученные по расчету площади армирования (см<sup>2</sup>/м).

Полученные площади арматуры оказались очень существенными. Очевидно, что запроектировать подобную конструкцию проблематично: в некоторых зонах в конструкцию придется заложить более 3 рядов арматуры диаметром 40 мм при шаге стержней 200 мм.

Было предложено конструктивное решение в виде сдвоенных плит с ребрами жесткости (см. рис. 23). Шаг ребер 5 м, толщина плит и ребер 400 мм.

При использовании такого решения получились приемлемые результаты армирования как ребер, так и обеих плит (см. рис. 24).

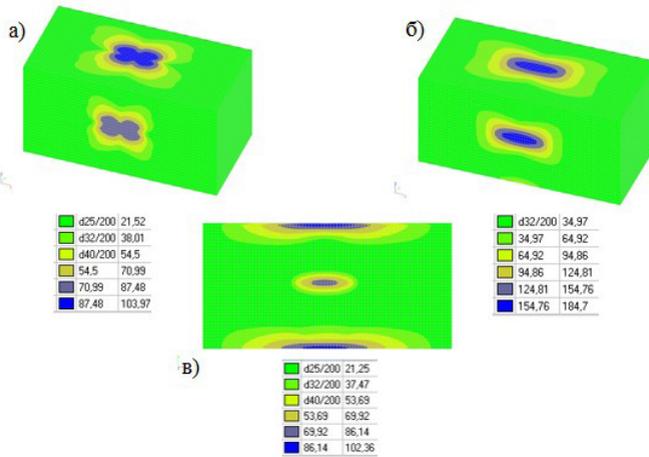


Рисунок 22– Результаты расчета рабочего армирования строительных конструкций ( $\text{см}^2/\text{м}$ ): а – нижнее армирование покрытия и армирование с внутренней стороны стены по направлению вдоль здания; б – нижнее армирование покрытия и армирование с внутренней стороны стены по направлению поперек здания; в – верхнее армирование по направлению покрытия поперек здания



Рисунок 23 – Продольный разрез по плите покрытия

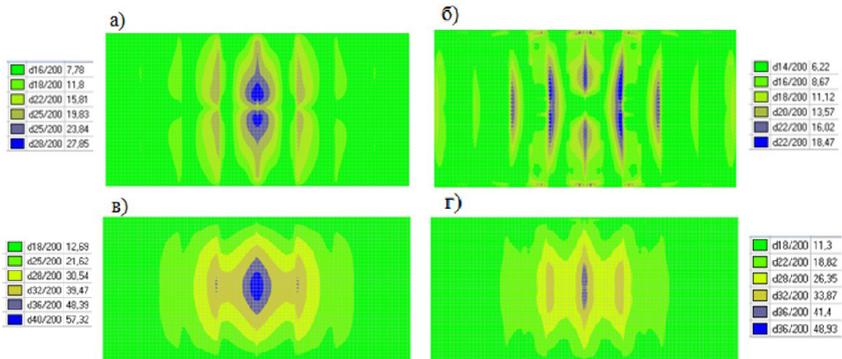


Рисунок 24 – Результаты расчета армирования нижней плиты двойного покрытия с ребрами жесткости шагом 5 м ( $\text{см}^2/\text{м}$ ): а – нижняя арматура в продольном направлении; б – верхняя арматура в продольном направлении; в – нижняя арматура в поперечном направлении; г – верхняя арматура в поперечном направлении

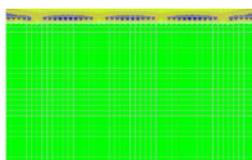
### *Повышение сейсмостойкости «мокрого» отдельно стоящего ХОЯТ путем усиления грунтового основания*

Усиление грунта различными способами (цементация, силикатизация, устройство наклонных свай, либо изначальное применение свайных фундаментов) приводит к повышению модуля сдвига основания. Влияние жесткости грунтового основания на инерционные нагрузки, действующие на каркасную часть, было оценено в главе 2, поэтому рассматриваться в данном случае не будет.

Ниже приведено требуемое по расчету армирование нижней, железобетонной части «мокрого» ХОЯТ (конструктивное исполнение и расчетная модель сооружения была описана в главе 2) при посадке сооружения на естественное основание с модулем деформации 5МПа и сейсмическом воздействии интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64.

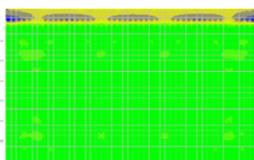
В случае отсутствия мероприятий по усилению грунта либо свай, наибольшая требуемая по расчету площадь арматуры была получена в верхней зоне фундаментной плиты, в поперечном направлении (см. рис. 25).

Далее было рассмотрено это же сооружение, в основании которого залегают грунты, усиленные цементацией (см. рис. 26).



2,62e-004	16,77
16,77	33,53
33,53	50,3
50,3	67,06
67,06	83,83
83,83	100,6

Рисунок 25 – Арматура верхней зоны фундаментной плиты при естественном основании (см<sup>2</sup>/м)



1,54e-003	8,54
8,54	17,07
17,07	25,61
25,61	34,14
34,14	42,68
42,68	51,22
51,22	59,75

Рисунок 26 – Арматура верхней зоны фундаментной плиты при цементации грунтового основания (см<sup>2</sup>/м)

Таким образом, при усилении грунтового основания, либо изначальном использовании свайного основания, снижаются инерционные сейсмические нагрузки на каркас «мокрых» ХОЯТ, а также уменьшается требуемая по расчету площадь армирования монолитной железобетонной части сооружения. В данном случае максимальная площадь арматуры уменьшилась в 1,7 раз, произошло уменьшение зоны образования и раскрытия трещин, процент армирования конструкции в поперечном направлении уменьшился в 1,5 раз, в продольном направлении – в 1,6 раз.

## **III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Изучены существующие типы хранилищ отработавшего ядерного топлива, проанализированы их достоинства, недостатки и особенности конструктивных решений, установлено, что наиболее уязвимым к землетрясению типом хранилищ являются построенные много лет назад «мокрые» ХОЯТ с гибкой каркасной верхней частью, являющейся слабым звеном таких сооружений.

2. Разработана методология системного многофакторного обоснования сейсмостойкости «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ, основанная на наиболее вероятном сценарии отказа строительных конструкций.

3. Установлено, что для рассматриваемого типа ХОЯТ наиболее неблагоприятной ситуацией является сочетание низкочастотных сейсмических воздействий и мягких грунтов. В этом случае ответные ускорения оказались в 3 раза интенсивнее, чем при таком же воздействии на жестком грунте и в несколько десятков раз интенсивнее, чем в случае сочетания мягкого грунта и высокочастотного воздействия.

4. Установлено, что наиболее вероятным сценарием отказа строительных конструкций «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ при сейсмических воздействиях является обрушение гибкой каркасной верхней части сооружения.

5. Установлено, что свойства грунтового основания оказывают существенное влияние только на вертикальные сейсмические ускорения каркаса эксплуатируемых «мокрых» ХОЯТ. Влияние на горизонтальные ответные ускорения оказалось несущественным. При этом трехкратное повышение жесткости грунта привело к снижению сейсмических нагрузок, вызванных вертикальной компонентой землетрясения в 4 раза, что говорит об эффективности укрепления основания, как меры повышения сейсмостойкости «мокрых» ХОЯТ под подошвой фундаментов которых залегают слабые грунты. Для укрепления основания рекомендуется применять цементацию, так как данный способ обладает рядом преимуществ (быстрота, возможность работы в ограниченном пространстве, отсутствие влияния на фундамент здания в отличие от забивки или бурения свай).

6. Для повышения сейсмостойкости «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ при их эксплуатации рекомендуется отказаться от уплотненного хранения отработавшего топлива, по возможности держать отсеки хранения как можно менее загруженными, при этом топливо необходимо распределять равномерно, избегая эксцентриситетов.

7. Выполнен комплекс исследований по оценке влияния повреждений на сейсмостойкость «мокрых» хранилищ отработавшего ядерного топлива. Установлено, что повреждения могут привести к чрезмерным взаимным перемещениям элементов конструкций при землетрясении, что вызывает их обрушение. Предложена концепция устройства, ограничивающего взаимные перемещения строительных конструкций «мокрых» ХОЯТ при землетрясении и тем самым повышающего их сейсмостойкость. Эксплуатирующим

организациям рекомендовано особое внимание уделять отклонению колонн и наружных стен от вертикального положения.

8. Предложено конструктивное решение в виде сдвоенных плит с промежуточными ребрами, обеспечивающее прочность большепролетных стен и перекрытий ХОЯТ при землетрясении.

9. Установлено, что при усилении основания «мокрых» отдельно стоящих ХОЯТ или их проектировании на свайном фундаменте, снижаются инерционные сейсмические нагрузки на каркас этих сооружений, а также повышается сейсмостойкость строительных конструкций в целом.

**Перспективой дальнейшей разработки** данной темы является изучение возможности применения демпфирующих устройств для обеспечения сейсмостойкости эксплуатируемых «мокрых» ХОЯТ, а также разработка эффективной методики динамических расчетов прочности свай в составе свайных полей.

#### **IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

*Статьи, опубликованные в научных журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:*

1. Зенченкова Д.В., Травин С.М. Анализ и оценка риска аварий сооружения как системы методом построения «дерева отказов» на примере объекта атомной энергетики при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 1. С.64-79. DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-64-79

2. Белаш, Т.А., Травин, С.М. О возможности использования существующих методов учета грунтового основания при динамических расчетах строительных конструкций // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1.

3. Травин С.М. Учет динамических свойств грунта при расчете свайных фундаментов объектов использования атомной энергии при сейсмических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 4.

4. Травин С.М. Применение демпфирующих устройств для повышения сейсмостойкости существующего «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 5.

5. Травин С.М. Изучение влияния жесткости грунтового основания на интенсивность колебаний строительных конструкций хранилища отработавшего ядерного топлива при сейсмическом воздействии // Известия Петербургского университета путей сообщения, выпуск 1 (42), 2015.

6. Белаш Т.А., Травин, С.М. К вопросу влияния повреждений строительных конструкций существующего «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива на его сейсмостойкость // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 6.

7. Белаш Т.А., Травин, С.М. Об интенсивности колебаний строительных конструкций «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива при землетрясении // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 2.

***Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:***

1. T. Belash, S.Travin. The use of long-span coating plates in case of reconstruction of “wet” spent nuclear fuel storage facilities. // "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 962 (2020) 022064 DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022064 (Scopus)

***Другие публикации по теме диссертации:***

1. Травин С.М. Устойчивость хранилищ отработавшего ядерного топлива к экстремальным воздействиям природного и техногенного происхождения. // Научно-практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Тезисы докладов. Москва, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 1–2 декабря 2016 г. С. 147–148.

2. Травин С.М. Сейсмостойкость «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива при его неравномерной загруженности // Сборник научных статей XIX научно-методической конференции ВИТУ. – СПб., 2015 – С.237–242.

3. Травин С.М. О влиянии смещения центра масс на колебания строительных конструкций «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива при землетрясении // Сборник материалов научно-методической конференции, посвященной 150-летию кафедры «Здания» – СПб., 2015 – С. 25–30.

4. Травин С.М. К вопросу влияния фактического состояния строительных конструкций «мокрого» хранилища отработавшего ядерного топлива на его сейсмостойкость. // XI Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Тезисы докладов. Сочи, 24–28 августа 2015 г. С. 161–162.

5. Белаш Т.А., Травин С.М. О влиянии возможных повреждений на напряженное состояние строительных конструкций существующего объекта использования атомной энергии. // Будівельні конструкції. Випуск 78, книга 2, Київ, 2013 – С. 212–218.

6. Попов, А.И., Травин С.М., Тропкин С.Н. Исследование динамического поведения хранилища отработавшего ядерного топлива при особых внешних воздействиях // Труды международной научно-практической конференции «инженерные системы - 2010» – Москва, РУДН, 2010 – С. 104–109.

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 08.04.2021. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 19.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.