

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



Скорикова Мария Игоревна

**Влияние реологических характеристик бетона и воздействие  
неравномерной нагрузки на напряженно-деформированное состояние  
защитной оболочки АЭС**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

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

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Стрижов Валерий Федорович.

Официальные оппоненты: Панасюк Леонид Николаевич,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Техническая механика», Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования «Донской государственный  
технический университет»;

Медведев Вячеслав Викторович,  
кандидат технических наук, научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт строительных  
материалов и технологий Московского  
государственного строительного университета.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», г. Москва.

Защита состоится 22 сентября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного  
совета Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Института проблем  
безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте  
<http://ibrae.ac.ru/contents/517/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.



В. Е. Калантаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Атомная энергетика является одной из динамично развивающихся отраслей, обеспечивающих энергоне­зависимость Российской Федерации. После введения в эксплуатацию новых энергоблоков (1—4 энергоблоки Ростовской АЭС, 3 и 4 Калининской АЭС, 1 и 2 энергоблоки второй очереди Ленинградской АЭС, 1 и 2 энергоблоки второй очереди Нововоронежской АЭС) доля выработки электроэнергии на атомных электростанциях составляет около 20 %.

Стратегической задачей одного из лидеров мировой атомной промышленности Госкорпорации «Росатом» является стабильное снабжение страны производимой на АЭС электроэнергией. При этом большое внимание уделяется вопросам безопасной эксплуатации атомных электростанций и экологической безопасности.

Важным элементом в системе безопасности АЭС являются железобетонные предварительно напряженные защитные оболочки (ЗО), обеспечивающие нераспространение радиоактивных элементов в окружающую среду, относящиеся к пассивной системе защиты, поскольку в случае возникновения проектной аварии для включения в работу они не требуют наличия энергоснабжения или каких-либо действий обслуживающего персонала.

Однако для того, чтобы в случае возникновения проектной аварии защитная оболочка гарантированно выполнила свои локализирующие функции, ее техническое состояние должно соответствовать проектным критериям по прочности и надежности.

Эксплуатационная пригодность предварительно напряженной железобетонной защитной оболочки АЭС определяется, главным образом, уровнем ее преднапряжения, работоспособностью системы преднапряжения защитной оболочки (СПЗО) и напряженно-деформированным состоянием (НДС) строительных конструкций.

Одним из критериев эксплуатационной пригодности защитной оболочки АЭС на протяжении всего срока службы (возведение, проектный и за­проектный

срок, вывод из эксплуатации) является величина усилия натяжения арматурных канатов, которая снижается в процессе эксплуатации вследствие проявления реологических характеристик применяемых материалов. Для обеспечения минимально допустимого уровня натяжения арматурных канатов в период эксплуатации производится замена отдельных арматурных канатов СПН-1000 на арматурные пучки СПЗО-М. После монтажа пучка СПЗО-М осуществляется инъектирование каналообразователя цементным раствором под давлением. Давление инъекционного раствора может привести к образованию трещин в бетоне вблизи каналообразователей. Кроме того, раствор может проникнуть в соседний канал, в результате чего система преднапряжения защитных оболочек станет неремонтопригодной.

Для оценки возможного негативного последствия при замене арматурных канатов СПН-1000 на арматурные пучки СПЗО-М возникла необходимость создания расчетной методики и модели, способных выполнять многофакторный анализ напряженно-деформированного состояния стенки защитной оболочки при значительных нагрузках внутри ее сечения.

Для обслуживания реактора в процессе его работы и необходимых плановых ремонтов внутри защитной оболочки устанавливается кран кругового действия, который опирается непосредственно на стенки оболочки и также является одним из факторов, вызывающих неравномерность напряженно-деформированного состояния.

В этой связи основной задачей оценки безопасной эксплуатации защитной оболочки АЭС является определение её напряженно-деформированного состояния и прогнозирование возможности дальнейшей эксплуатации на основе анализа изменения свойств материалов, произошедшего в процессе возведения и эксплуатации защитной оболочки.

Данная работа посвящена актуальной проблеме расчета напряженно-деформированного состояния, обоснования прочности и безопасности железобетонных предварительно-напряженных защитных оболочек АЭС.

На основе большого объема эмпирических данных анализируется влияние реологических характеристик бетона и неравномерное распределение нагрузок по сечению стенки сооружения на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки. Полученные в работе данные, модели и результаты могут быть использованы для расчетного прогнозирования безопасности эксплуатации защитных оболочек АЭС и для анализа эксплуатационной пригодности других сооружений из предварительно напряженного железобетона.

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является исследование влияния реологических характеристик бетона и воздействия неравномерной нагрузки на изменение напряженно-деформированного состояния и безопасность эксплуатации защитной оболочки атомной электростанции.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- Исследование влияния реологических характеристик бетона и экзотермии на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС на основе сравнительного анализа данных испытаний бетона на усадку и ползучесть, натурных наблюдений, расчета деформаций и напряжений в арматуре и бетоне от усадки и ползучести бетона;
- Разработка детальных численных моделей защитной оболочки АЭС и выполнение с их помощью расчетного анализа напряженно-деформированного состояния с учетом влияния реологических характеристик бетона и воздействия неравномерно распределенных нагрузок внутри сечения стенки сооружения;
- Разработка рекомендаций по учету реологических свойств бетона при оценке изменения НДС защитных оболочек АЭС и снижению трещинообразования в оболочках от нагрузок, действующих внутри сечения стенки.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна состоит в том, что впервые применительно к конкретной конструкции защитной оболочки выполнен всесторонний анализ влияния усадки и ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние на основе результатов расчета, экспериментальных данных и результатов натурных наблюдений. Ранее вопросу влияния усадки и ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние строительных конструкций уделялось большое внимание многими авторами, однако расчетные зависимости строились, главным образом, на результатах лабораторных исследований.

На основе детального расчетного анализа и результатов натурных наблюдений определены причины трещинообразования внутри стенки защитной оболочки.

### **Практическая значимость**

Результаты исследований влияния усадки и ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние защитных оболочек АЭС использованы для верификации расчетных моделей ЗО и программных средств, применяемых для расчета защитных оболочек АЭС. Получены расчетные данные об изменении усилий в канатах СПЗО с увеличением времени эксплуатации вследствие проявления реологических свойств бетона, что позволяет прогнозировать достаточность обжатия защитной оболочки и безопасность конструкции на всех стадиях жизненного цикла.

Для действующих, строящихся и проектируемых защитных оболочек АЭС на основе современных численных методов (конечных элементов и суперэлементов) разработаны расчетные модели, способные выполнять многофакторный анализ НДС стенки защитной оболочки при воздействии нормальных и аварийных нагрузок с целью снижения трещинообразования в бетоне при испытаниях и эксплуатации полярного крана, при инъектировании каналобразователей и преднапряжении (натяжении арматурных канатов).

## **Положения, выносимые на защиту**

Результаты обобщения комплексных исследований физико-механических и реологических характеристик бетона при кратковременных и длительных нагрузках.

Разработанные детальные численные модели защитной оболочки АЭС с учетом реологических свойств бетона, позволяющие получить подробную картину напряженно-деформированного состояния конструкции при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния защитной оболочки с учетом ползучести бетона, на действие нагрузок полярного крана (собственного веса, воздействия при испытаниях и монтаже корпуса реактора) и локальных нагрузок внутри сечения стенки защитной оболочки при воздействии давления инъекционного раствора.

Рекомендации по учету реологических свойств бетона при оценке изменения напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС и снижению трещинообразования в оболочках от нагрузок, действующих внутри сечения стенки.

## **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается сравнением результатов расчетов с решениями других авторов, представленными в открытых источниках, и данными экспериментальных исследований и натурных наблюдений на реальных сооружениях.

## **Личный вклад автора**

Все результаты работы, выносимые на защиту диссертации, получены автором лично, либо при его непосредственном участии, а именно:

- Постановка задач исследований, анализ литературы и обобщение результатов исследований других авторов;
- Проведение расчетов по определению влияния усадки и ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС;

- Всесторонний анализ реологических характеристик бетона на основе проведенных расчетов, результатов экспериментов и данных натуральных наблюдений;
- Непосредственное участие в разработке расчетных моделей, расчетах НДС ЗО с учетом влияния реологических свойств бетона, при воздействии неравномерно распределенных нагрузок и оценке их влияния на эксплуатационные качества защитной оболочки, анализе и обработке результатов;
- Разработка рекомендаций по учету реологических свойств бетона при оценке изменения НДС защитных оболочек АЭС и снижению трещинообразования в оболочках от нагрузок, действующих внутри сечения стенки.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

- Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН в 2018, 2019 гг. (г. Москва, Россия);
- 11-я Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2018 в 2018 г. (г. Москва, Россия);
- XIV, XV Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» в 2018, 2019 гг. (г. Волгоград, Россия);
- 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ в 2020 г. (г. Москва, Россия).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, сделано 6 докладов на конференциях.



## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 192 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 120 страниц основного текста, включая 7 таблиц и 60 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность результатов, личный вклад автора, информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования.

**В первой главе** формулируется постановка задачи, приведен обзор литературы, рассматриваются ключевые конструктивные особенности и нагрузки, действующие на защитную оболочку.

**В разделе 1.1** дано определение защитной оболочки реакторного отделения АЭС, описаны особенности конструкции, сформулированы основные факторы, определяющие техническое состояние и срок службы ЗО.

**В разделе 1.2** рассматриваются нагрузки и воздействия на строительные конструкции преднапряженных железобетонных защитных оболочек в процессе эксплуатации.

**Раздел 1.3** посвящен обзору научных работ российских и зарубежных авторов по рассматриваемой тематике. Исследуются усадка и ползучесть бетона, а также их влияние на напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций.

**Раздел 1.4** содержит постановку цели и задач исследования.

**Во второй главе** выполняется всесторонний анализ влияния усадки и ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС на основе результатов расчета, экспериментальных данных и результатов натурных наблюдений.

**В разделе 2.1** расчетным путем определены деформации усадки и ползучести бетона, деформации и напряжения в арматуре и бетоне от усадки и ползучести бетона.

**В разделе 2.2** проанализированы экспериментальные исследования по определению прочностных и деформационных характеристик укладываемого в защитную оболочку энергоблока №3 Ростовской АЭС бетона. Выявлено соответствие бетона принятому классу.

Результаты показали, что средняя фактическая прочность бетона в пересчете на стандартную кубиковую прочность, полученная в ходе лабораторных испытаний бетона, составляет 45,3 МПа в возрасте 28 суток и 57,3 МПа в возрасте 90 суток, что несколько выше нормативных значений.

Анализ результатов испытаний на ползучесть под постоянной нагрузкой позволил определить величину меры ползучести для бетона при нагружении в возрасте 28 суток, которая составила  $2,8 \cdot 10^{-5}$  МПа<sup>-1</sup> и  $2,7 \cdot 10^{-5}$  МПа<sup>-1</sup> для бетона при нагружении в 90 суток.

**В разделе 2.3** проанализированы результаты натурных наблюдений за изменением напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС по показаниям датчиков контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

Исследовано влияние экзотермии бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС на основе показаний датчиков КИА. Оценка показала, что полученный характер перераспределения напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне объясняется тем обстоятельством, что в кольцевом направлении в большей степени возникают ограничения перемещений. Следовательно, в стенке защитной оболочки возможно появление трещин, которое в массивном бетоне носит термический характер.

Анализ изменения напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне от усадки бетона с момента окончания бетонирования захватки в течение продолжительного времени показал незначительные приращения сжимающих напряжений в стержневой арматуре и деформаций в бетоне в кольцевом

направлении. В меридиональном направлении наблюдается сжатие в стержневой арматуре порядка  $-20$  МПа (рисунок 1). Очевидно, с увеличением вертикальной нагрузки при наращивании вышележащих блоков бетонирования в вертикальной арматуре происходит нарастание сжимающих напряжений. Поэтому собственный вес вышележащих конструкций наряду с деформациями усадки бетона приводит к увеличению сжатия в оболочке.

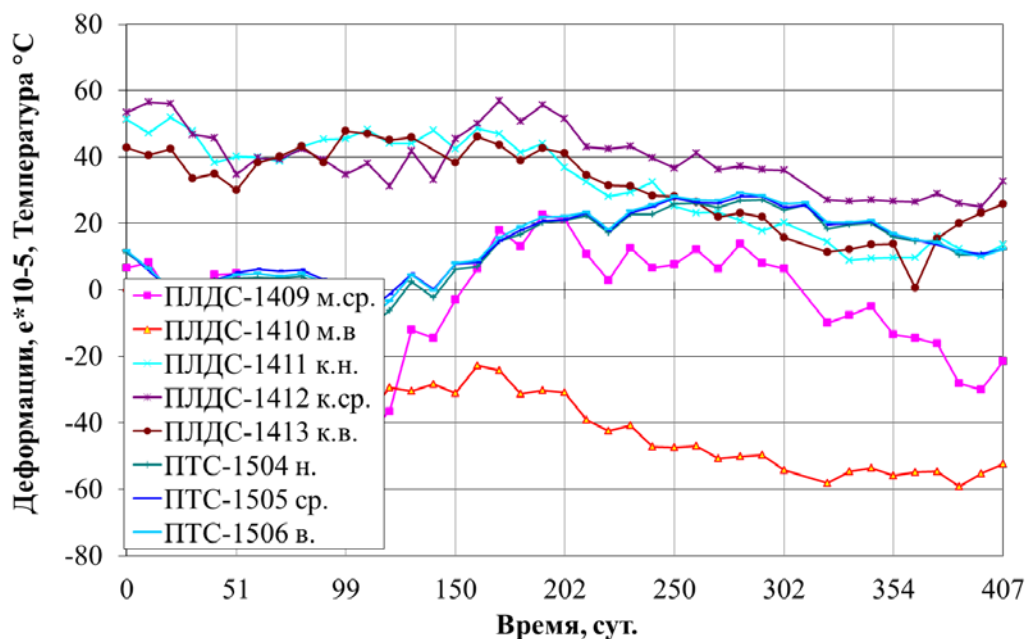


Рисунок 1 – Деформации и температура в бетоне в течение года с момента окончания бетонирования захватки защитной оболочки (створ 1, отметка 32,6 м)

Оценка результатов измерений с момента окончания преднапряжения защитной оболочки до начала приемо-сдаточных испытаний показала увеличение сжимающих напряжений в стержневой арматуре и сжимающих деформаций в бетоне вследствие проявления деформаций ползучести бетона.

**В разделе 2.4** дано сравнение расчетных, экспериментальных и натурных данных деформаций усадки бетона, показавшее, что величины деформации усадки бетона в натурной конструкции могут существенно отличаться от данных, полученных на образцах. Прежде всего, это связано с различными температурными и влажностными условиями. Кроме того, поскольку из-за наличия металлической облицовки массообмен с окружающей средой

происходит только через наружную поверхность, величина усадки бетона по сечению стены может быть различной: максимальное ее значение будет у наружной поверхности, минимальное – у внутренней. Также при испытании бетонных образцов не учитывался масштабный фактор натурной конструкции, к тому же отсутствовала стержневая арматура и облицовка.

Был сделан вывод о том, что для получения объективной картины напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок необходимо использовать детальные расчетные модели, в которых могут быть учтены особенности реологических характеристик бетона.

**Третья глава** посвящена описанию разработанных детальных численных моделей защитной оболочки АЭС и расчетному анализу напряженно-деформированного состояния с учетом влияния реологических характеристик бетона и воздействия неравномерно распределенных нагрузок внутри сечения стенки сооружения.

**В разделе 3.1** рассматривается программный комплекс CONT, использованный для разработки конечноэлементных моделей защитной оболочки АЭС, представлено краткое описание программных модулей и методик расчета напряженно-деформированного состояния ЗО.

**В разделе 3.2** изучен вопрос возникновения эллиптичности и трещинообразования в стенке защитной оболочки АЭС при воздействии нагрузок от работающего полярного крана в период возведения сооружения. Рассмотрены полностью симметричные варианты нагружения крана по центральной оси оболочки, а также несимметричные при смещении нагрузки вдоль оси крана к стенке ЗО (случай погрузки корпуса реактора при его установке). Разработана модель защитной оболочки с краном, имеющая только одну плоскость симметрии – вдоль оси крана, и включающая половину цилиндрической части ЗО (рисунок 2). Расчетная модель состоит из 1 396 263 узлов и 1 672 288 конечных элементов. Кран моделируется упрощенно в виде

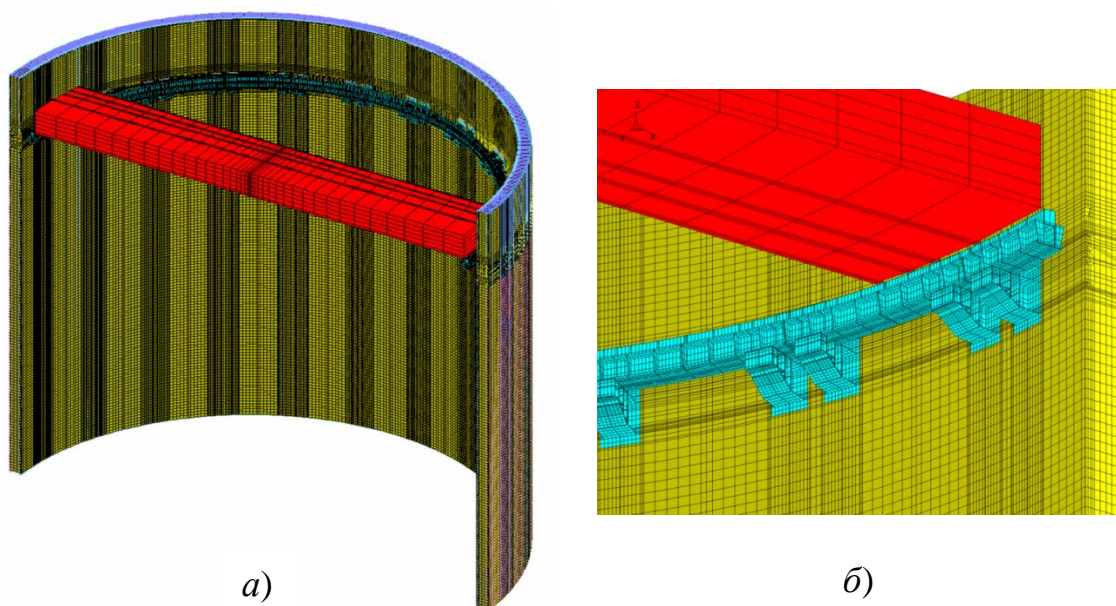


Рисунок 2 – *а)* Модель половины защитной оболочки с полярным краном (материалы: ■ – бетон, ■ – сталь покрывной балки и консолей, ■ – стальная облицовка, ■ – кран, ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ – арматура), *б)* укрупненный фрагмент, содержащий подкрановые конструкции

призматического тела эквивалентной массы, подробно моделируются подкрановые пути, подкрановые консоли и зоны их крепления к стенке ЗО.

Приводятся результаты расчета напряженно-деформированного состояния защитной оболочки на действие нагрузок полярного крана — собственного веса, воздействий при испытаниях и монтаже корпуса реактора.

Расчет НДС ЗО при воздействии веса крана после его монтажа показал, что в зоне подкрановых консолей, ближайших к опорным конструкциям крана, имеет место характерное выпучивание стенки оболочки, которое связано с совместным деформированием подкрановых путей с краном и стенки оболочки. Величина перемещений составляет  $\sim 2,27$  мм (рисунок 3, *а)*, увеличивая диаметр ЗО на 4,54 мм, что соответствует результатам измерений при повороте крана на  $90^\circ$  после монтажа, где увеличение диаметра вдоль оси крана составило 4,66 мм.

Анализ полученных результатов показал, что при воздействии на цилиндрическую часть оболочки веса полярного крана в результате выпучивания наружу стенки в зоне установки подкрановых консолей на

внешней поверхности бетонной стенки оболочки возникают растягивающие напряжения  $\sim 2$  МПа (рисунок 3, б). Полученный уровень близок к пределу прочности бетона на растяжение и, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне 3О могут образовываться меридиональные трещины незначительной глубины.

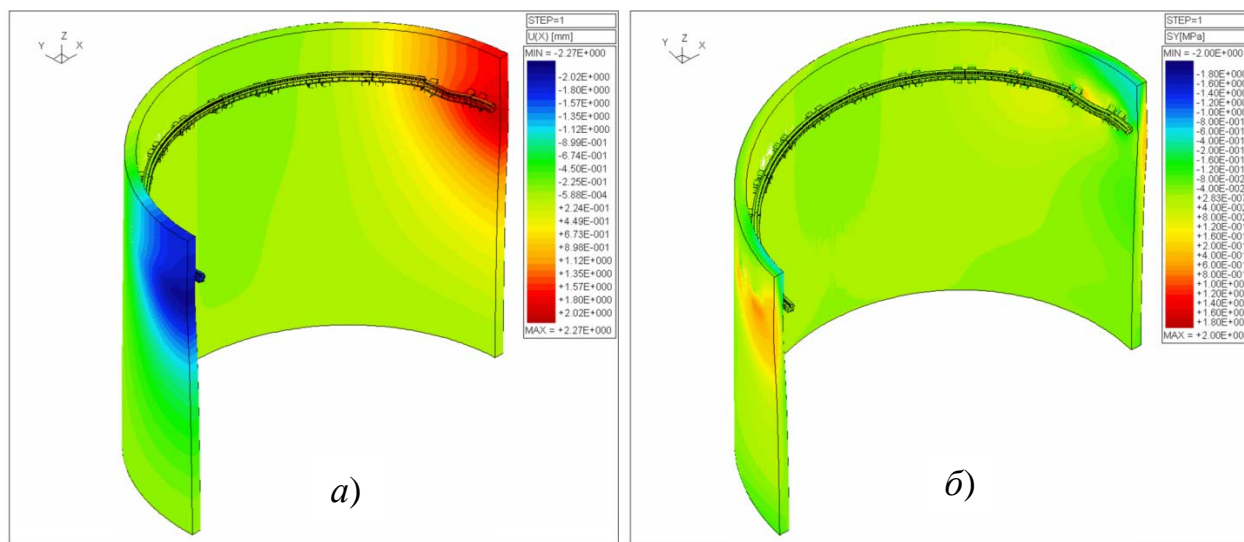


Рисунок 3 – а) Перемещения стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана, б) окружные напряжения в бетоне стенке оболочки при воздействии собственного веса полярного крана

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния 3О при испытаниях полярного крана показали, что величина перемещения стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана составляет  $\sim 2,01$  мм (рисунок 4), что хорошо соотносится с результатами измерений.

Расчет НДС 3О при монтаже корпуса реактора показал, что в результате выпучивания наружу стенки защитной оболочки вблизи транспортного коридора на внешней поверхности бетонной стенки оболочки возникают растягивающие окружные и меридиональные напряжения  $\sim 3$  МПа (рисунок 5). Полученный уровень превышает предел прочности бетона на растяжение, вследствие чего в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины.

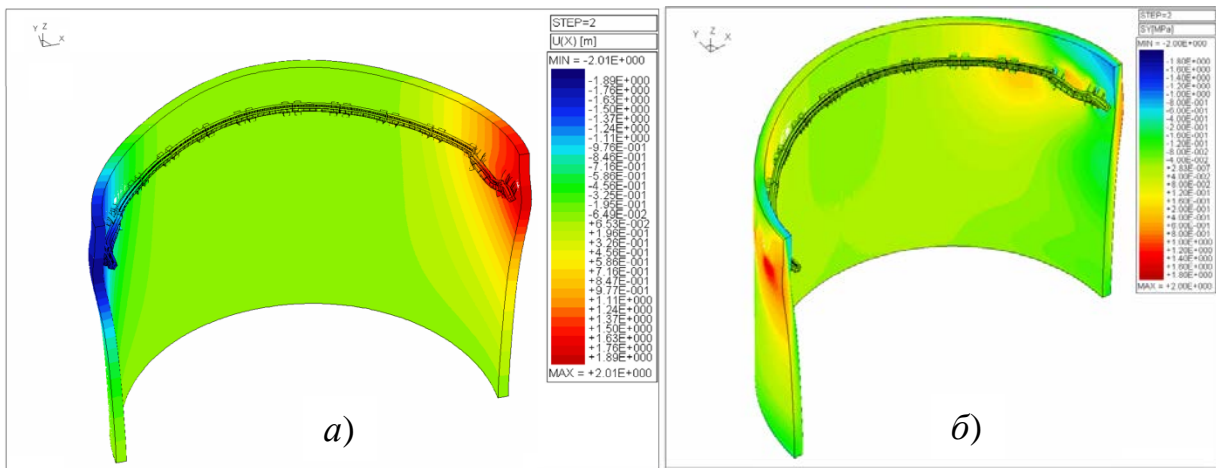


Рисунок 4 – *а)* Перемещения стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана, *б)* окружные напряжения в бетоне стенке оболочки при воздействии испытательной нагрузки полярного крана

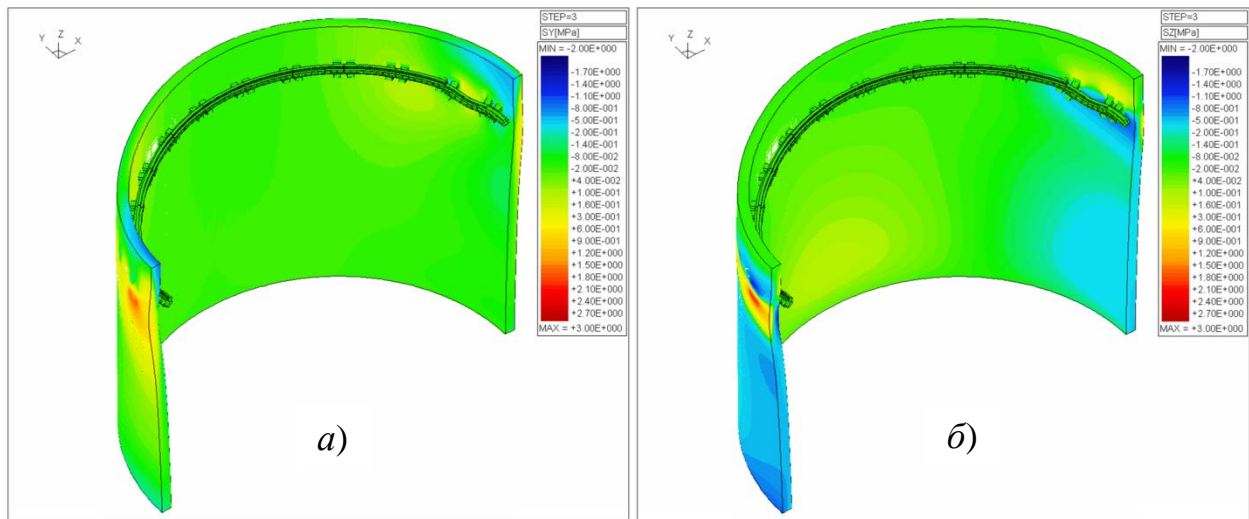


Рисунок 5 – Окружные (*а)* и меридиональные (*б)*) напряжения в бетоне стенки оболочки при воздействии транспортировки корпуса реактора полярного крана

Рассмотрено влияние колебаний температуры окружающей среды в зоне расположения полярного крана. Рекомендуется наружную поверхность цилиндрической части защитной оболочки в зоне над обстройкой покрыть теплоизоляционным слоем, чтобы уменьшить негативные воздействия температуры окружающей среды и увеличить срок службы конструкции.

В разделе 3.3 рассматривается влияние давления инъекционного раствора на трещиностойкость конструкции. Поскольку условием безопасной эксплуатации системы преднапряжения защитной оболочки является ее ремонтпригодность, при замене арматурных канатов СПН-1000 на арматурные пучки СПЗО-М необходимо исключить попадание инъекционного раствора в соседние каналобразователи. В этой связи проанализированы особенности предварительного напряжения защитной оболочки в случае применения системы СПЗО-М. Разработана детальная численная модель ЗО, в которой смоделированы реальная геометрия и положение каналобразователей по толщине стенки в три слоя, герметизирующая облицовка, стержневая арматура в кольцевом, меридиональном и радиальном направлениях (рисунок 6). Для совместимости сеток арматуры и бетонной стенки разработан специальный алгоритм, не требующий совпадения «узел в узел».

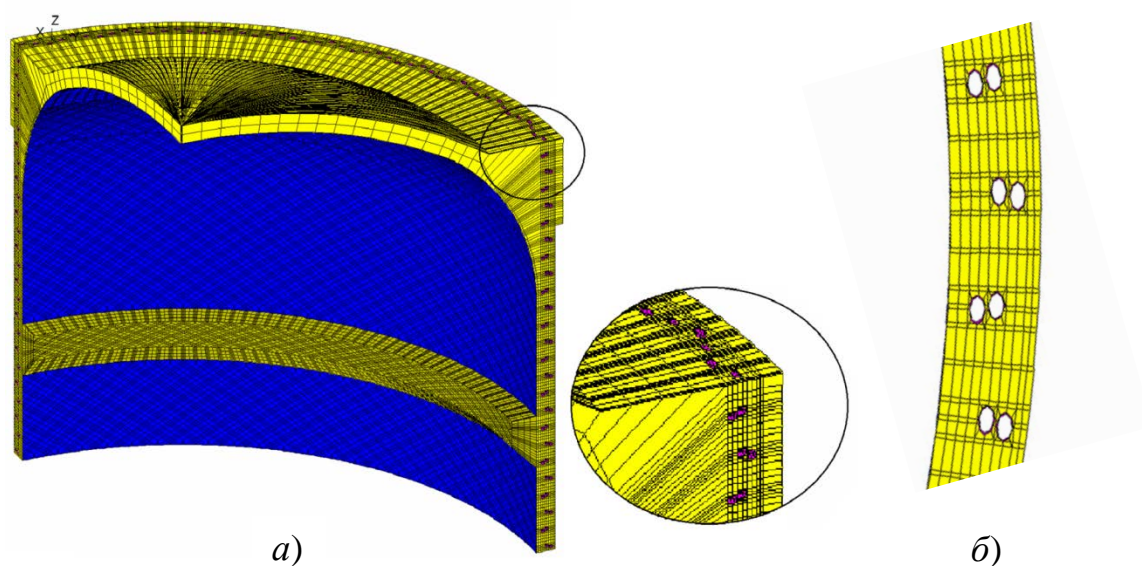


Рисунок 6 – а) Конечноэлементная модель верхней части ЗО из 354 115 конечных элементов, 416 368 узлов, 1 249 404 степеней свободы ( ■ — бетон; ■ — вкладыши в каналобразователи, ■ — облицовка, ■ — подкрановая консоль), б) фрагмент поперечного сечения с указанием каналобразователей



Расчеты защитной оболочки при воздействии нагрузок, действующих внутри стенки, показали, что при инъецировании канала под давлением 1 МПа при нарушении его герметичности в бетоне между перекрещивающимися каналами могут образовываться трещины. В этой связи на этапе возведения рекомендуется предъявлять повышенные требования к узлам соединения полиэтиленовых каналобразователей. Поскольку максимальные главные напряжения в наиболее тонких зонах между перекрещивающимися каналами достигают предела прочности бетона на растяжение 2 МПа (рисунок 7), необходимо исключить одновременное инъецирование срединного и наружного или внутреннего каналов.

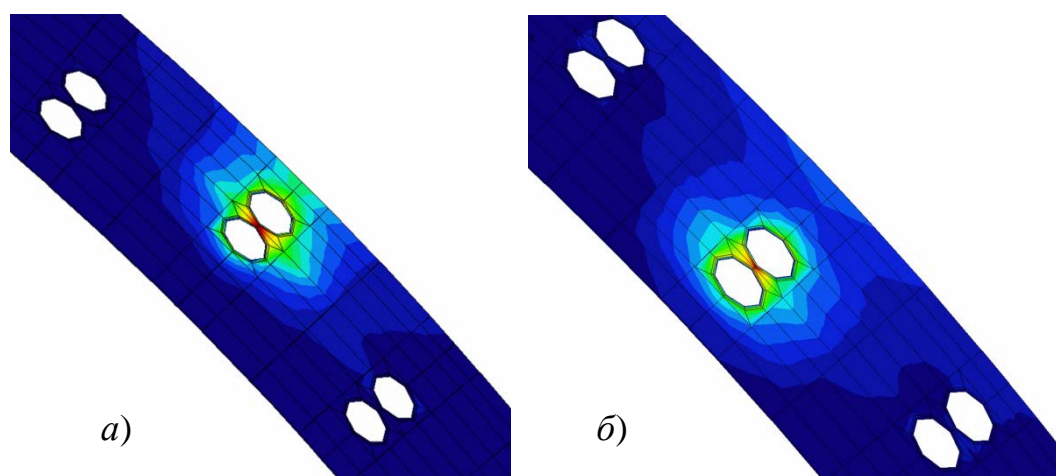


Рисунок 7 – Распределение максимальных главных напряжений с 0 (■) до 1,9 МПа (■) в поперечном сечении стенки 30 при одновременном инъецировании среднего и наружного каналов (а) и с 0 (■) до 2 МПа (■) при одновременном инъецировании среднего и внутреннего каналов (б)

**В разделе 3.4** рассматривается разработанная конечноэлементная модель для анализа кинетики НДС 30 с учетом ползучести бетона, и анализируются результаты расчета. Модель содержит 966 680 узлов и 1 284 628 конечных элементов (рисунок 8, а). Нагрузка от преднапряжения представлена в виде неравномерно распределенного давления на срединную поверхность модели оболочки, вычисляемого в соответствии с геометрией каждого канала и величины усилия его натяжения с учетом потерь на трение (рисунок 8, б).

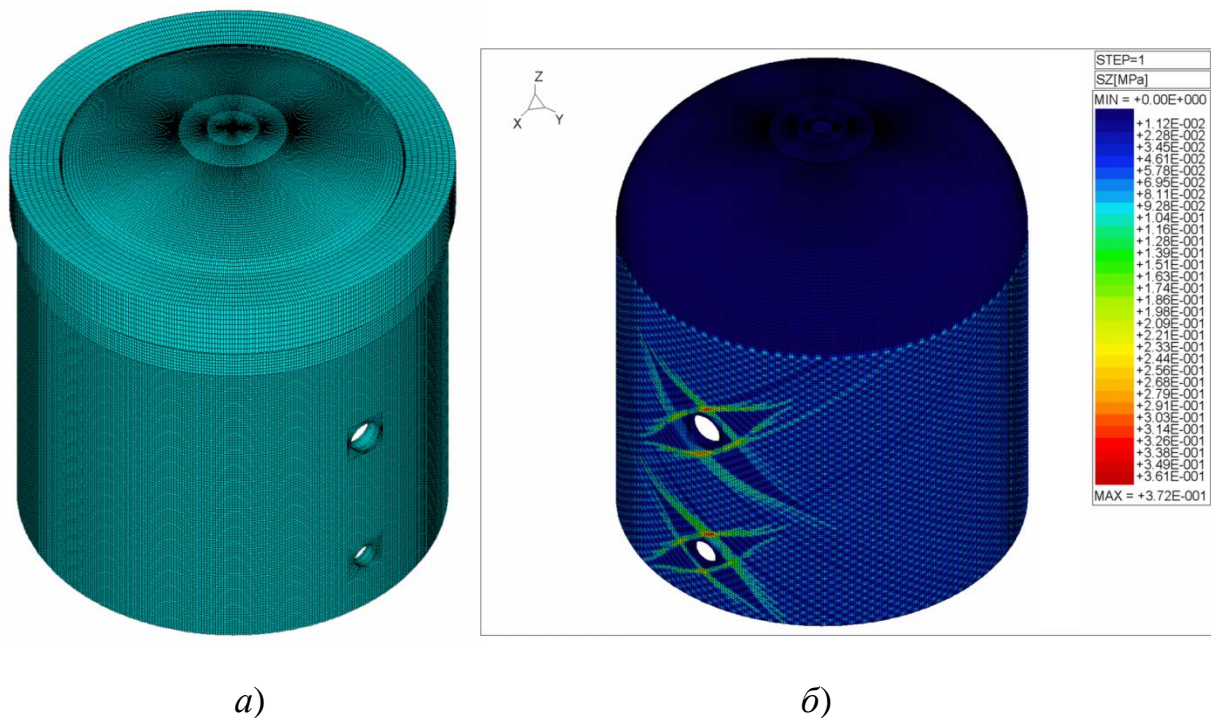


Рисунок 8 – а) Конечноэлементная модель защитной оболочки,

б) распределение давления по срединной поверхности цилиндрической части модели ЗО, моделирующее воздействие со стороны канатов системы СПЗО-М

Проведенный расчет радиальных перемещений за счет ползучести бетона с учетом увеличения полученного значения при действии температурного разогрева  $\sim 9,3 \div 11,6$  мм показал хорошее согласование с данными измерений  $\sim 11,5$  мм. Приращение сжимающих напряжений в кольцевой внутренней арматуре составило 41,9 МПа, а в кольцевой наружной — 38,4 МПа. Эти величины хорошо коррелируют с измеренными значениями, составляющими  $\sim 41$  МПа и  $\sim 38$  МПа соответственно. Схожая картина в меридиональном направлении: приращение сжимающих напряжений внутренней арматуры  $\sim 19,8$  МПа, наружной  $\sim 18,1$  МПа, что хорошо коррелирует с измеренными значениями, составляющими  $\sim 21,4$  МПа и  $\sim 19$  МПа соответственно (при сравнении данных необходимо вычесть из измеренных значений составляющую, обусловленную перепадом температуры по толщине стенки ЗО).

Для оценки уровня потерь усилий в арматурных канатах системы СПЗО-М из-за изменения геометрии оболочки вследствие процесса ползучести бетона выполнено моделирование процесса деформирования защитной оболочки с учетом действующих нагрузок и характеристик ползучести бетона. Установлено, что действующие усилия на тяжных анкерах арматурных канатов цилиндра превышают минимальные на 28,6 тс, а купола – на 13,8 тс.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

Результатом диссертационной работы стали следующие выводы и рекомендации:

1) В связи с окончанием проектных сроков эксплуатации защитных оболочек ряда АЭС требуется анализ возможностей продления сроков их эксплуатации и разработка мероприятий по увеличению ресурса строительных конструкций. Основными факторами, влияющими на достоверную оценку напряженно-деформированного состояния защитной оболочки на всех стадиях жизненного цикла сооружения, являются: постоянно изменяющиеся во времени реологические свойства материалов, климатические воздействия и длительно действующие нагрузки внутри стен ЗО.

Для того чтобы судить о функциональной надежности защитной оболочки, требуется расчетное обоснование, проводимое с учетом реологических и деструктивных процессов, происходящих в материалах конструкций.

Эти вопросы являются актуальными как для эксплуатируемых, так и для строящихся блоков АЭС ввиду необходимости снижения повреждаемости железобетонных сооружений защитных оболочек в процессе возведения, эксплуатации и необходимости увеличения их ресурса.

Рекомендуется для получения полной картины напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок использовать детальные расчетные модели, позволяющие выполнять более объективную оценку.

2) При изучении вопроса возникновения эллиптичности и трещинообразования в стенке защитной оболочки АЭС при воздействии нагрузок от работающего полярного крана в период возведения сооружения был получен уровень растягивающих напряжений близкий к пределу прочности бетона на растяжение, что свидетельствует о возможности образования меридиональных трещин в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки. Поэтому рекомендуется предъявлять повышенное внимание зоне расположения крана кругового действия на стадии проектирования, строительства и эксплуатации сооружения.

3) Рекомендуется наружную поверхность цилиндрической части защитной оболочки в зоне над обстройкой покрывать теплоизоляционным слоем, уменьшая, таким образом, негативные воздействия температуры окружающей среды и увеличивая срок службы конструкции.

4) Поскольку условием безопасной эксплуатации системы преднапряжения защитной оболочки является ее ремонтпригодность, при замене арматурных канатов СПН-1000 на арматурные пучки СПЗО-М необходимо исключить попадание инъекционного раствора в соседние каналообразователи. Расчеты защитной оболочки при воздействии нагрузок, действующих внутри стенки, показали, что при инъектировании канала под давлением 1 МПа при нарушении его герметичности в бетоне между перекрещивающимися каналами могут образовываться трещины. В этой связи на этапе возведения рекомендуется предъявлять повышенные требования к узлам соединения полиэтиленовых каналообразователей. Поскольку максимальные главные напряжения в наиболее тонких зонах между перекрещивающимися каналами достигают предела прочности бетона на растяжение 2 МПа, необходимо исключить одновременное инъектирование срединного и наружного или внутреннего каналов.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России:

- 1) Медведев В.Н., Скорикова М.И. Влияние реологических характеристик бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 6, с. 317—320.
- 2) Медведев В.Н., Киселев А.С., Киселев А.С., Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н., Скорикова М.И., Пимшин Ю.И. К вопросу о контроле защитных оболочек АЭС в период приемо-сдаточных испытаний. — Глобальная ядерная безопасность, 2020, № 2 (35), с. 42—54.
- 3) Медведев В.Н., Скорикова М.И., Киселев А.С., Киселев А.С., Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н. Воздействие нагрузок внутри сечения стенки защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 2021, т. 130, вып. 1, с. 20—24.
- 4) Медведев В.Н., Скорикова М.И., Киселев А.С., Киселев А.С., Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н. Влияние работы полярного крана на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС. — Атомная энергия, 2021, т. 130, вып. 4, с. 215—218.
- 5) Сальников А.А., Медведев В.Н., Киселев А.С., Киселев А.С., Ульянов А.Н., Стрижов В.Ф., Скорикова М.И. Особенности НДС защитных оболочек АЭС на этапе возведения, преднапряжения, приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации. Сборник трудов конференции МНТК-2018 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Пленарные и секционные доклады. Москва, 23—24 мая 2018 г., с. 24—30.
- 6) Скорикова М.И. Оценка НДС защитной оболочки энергоблока №4 Ростовской АЭС в период приемо-сдаточных испытаний. Сборник трудов XIX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Москва, ИБРАЭ РАН, 22—23 ноября 2018 г., с. 155—158.

- 7) Скорикова М.И., Киселев А.С., Киселев А.С. Расчетный анализ защитной оболочки АЭС-2006 при воздействии предварительного напряжения. Сборник трудов XX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Москва, ИБРАЭ РАН, 12—13 сентября 2019 г., с. 145—147.
- 8) Киселев А.С., Киселев А.С., Медведев В.Н., Ульянов А.Н., Стрижов В.Ф., Скорикова М.И. Моделирование процесса преднапряжения защитной оболочки проекта АЭС-2006. Тезисы докладов XVI Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики». Волгодонск, ВИТИ НИЯУ МИФИ, 12—13 ноября 2020 года 2020 г., с. 74—77.

## Список сокращений

АЭС	– атомная электрическая станция;
ВВЭР	– водно-водяной энергетический реактор
ЗО	– защитная оболочка
КИА	– контрольно-измерительная аппаратура
НДС	– напряжённно-деформированное состояние
ПЛДС	– преобразователь линейных деформаций струнный
ПТС	– преобразователь температуры струнный
СПЗО	– система преднапряжения защитной оболочки

Место расположения датчика:

к.в.	– кольцевой внутренний
к.н.	– кольцевой наружный
к.ср.	– кольцевой средний
м.в.	– меридиональный внутренний
м.ср.	– меридиональный средний
в.	– внутренний
ср.	– средний
н.	– наружный

Скорикова Мария Игоревна

Влияние реологических характеристик бетона и воздействие  
неравномерной нагрузки на напряженно-деформированное состояние  
защитной оболочки АЭС

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.07.2022  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.  
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66