

На правах рукописи



ФАН ВАН ФУК

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ
ТОРЦОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСОВ ВЫСОКОГО
ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, СТРОИТЕЛЬНЫХ
И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Морозов Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Соколов Борис Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН, АО «Казанский Гипро-
нииавиапром», научный консультант;

Корсун Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехниче-
ский университет Петра Великого», кафедра «Стро-
ительство уникальных зданий и сооружений», про-
фессор;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный универ-
ситет путей сообщения Императора Александра I».

Защита состоится «23» декабря 2019 г. в 15³⁰ часов на заседании диссер-
тационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский госу-
дарственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005,
г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертаци-
онного совета (аудитория 219).

Тел./ факс: (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/fan-van-fuk>

Автореферат разослан 11 ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время, основным источником энергоресурсов Вьетнама являются углеводородное топливо. При этом из-за высокого внутреннего спроса на электроэнергию Вьетнам планирует еще построить как минимум 13 крупных угольных электростанций, которые, как уже известно, имеют крайне отрицательное воздействие на окружающую среду.

Вместе с тем, становится очевидным тот факт, что реальным энергетическим выбором человечества в XXI веке станет широкое использование ядерной энергии, которая может вырабатываться в корпусах высокого давления ядерных реакторов.

Кроме того, современные строительные и специальные технологии требуют создания крупногабаритных емкостей, способных выдерживать высокие внутренние давления порядка 10 и более МПа (автоклавы, аккумуляторы тепла, взрывные камеры, емкости для испытания глубоководных спускаемых аппаратов и пр.).

Корпуса высокого давления – это сложные многокомпонентные сооружения, которые включают в себя несущие силовые стенки, торцовые элементы, металлическую герметизирующую облицовку, теплоизоляцию и коммуникационные отверстия в торцовых элементах и стенках.

Появлению настоящей диссертации предшествовали исследования напряженно деформированного состояния и трещиностойкости цилиндрических и сферических корпусов высокого давления из дисперсно-армированного железобетона с высоким содержанием арматуры, которые, однако, не затронули специфику поведения торцовых элементов, внешне напоминающих своеобразные «пробки», работающие преимущественно на сжатие. Здесь могут рассматриваться варианты с использованием своеобразных шпонок, исключающих возможность смещения днища относительно стенок и тем самым обеспечивающих необходимую надежность работы внутренней облицовки, либо напротив – сопряжение выполняют без шпонок, то есть гладко, допуская смещение, когда днище практически превращается в пробку, при этом облицовка сохраняется при помощи специальных компенсаторов.

Исследования, направленные на определение напряженного состояния и величины предельной нагрузки торцовых элементов в зависимости от их сопряжения с силовой стенкой из тяжелого армоцемента, представляются весьма **актуальными**.

Степень разработанности темы диссертации. Современные корпуса высокого давления (КВД), выполняемые в железобетоне, предполагают в целях обеспечения необходимой трещиностойкости использование предварительного напряжения. На кафедре железобетонных и каменных конструкций СПбГАСУ на протяжении ряда лет ведутся исследования КВД

для ядерных реакторов (ЯР), аккумуляторов тепла (АТ), автоклавов (АК) и других напорных емкостей цилиндрической и сферической форм, принципиальной особенностью которых, отличающей их от традиционных конструктивных решений, является использование ненапряженного дисперсно армированного железобетона с высоким до 20% и более содержанием арматуры малых (3–5 мм) диаметров, получивший название тяжелый армоцемент (ТАЦ). Исследования ТАЦ, выполненные В. И. Берестневым, В. М. Бурцевым, В. И. Морозовым, В. И. Жуковым, Д. С. Степановой под руководством Г. Н. Шоршнева, обнаружили исключительно высокую трещиностойкость материала.

На рисунке 1 показана принципиальная конструктивная схема КВД ЯР. Оригинальность предлагаемой конструкции состоит в том, что торцовые элементы (днища) выполняются в виде толстых конусообразных плит, свободно опирающихся по боковой поверхности на конические сужения стенок из ТАЦ. Были изготовлены и испытаны физические модели КВД в разных вариантах: в 1/30, 1/10 и 1/3 натуральной величины.

Наряду с относительно простой технологией возведения таких емкостей, применение торцовых элементов типа «пробок» существенно снижает концентрации напряжений в угловых зонах.

До появления настоящей диссертации исследования работы таких торцовых элементов под нагрузкой, учитывающих их специфику, проведено недостаточно, что затрудняет вопросы практической реализации при проектировании подобных сооружений. В основу настоящей разработки положены предложения инженера В. М. Бурцева, а также некоторые результаты исследований Г. Н. Шоршнева, В. И. Морозова и Э. К. Опбула.

Цель диссертации – разработка аналитического и численного методов расчета напряженного состояния торцовых элементов с учетом их сопряжения с силовой стенкой корпусов высокого давления и определение величины предельной нагрузки.

Задачи исследования состоят в следующем:

1. На базе известных исследований о прочности бетона обосновать расчетную схему осесимметричных толстых плит, опертых по конической поверхности применительно к торцовым элементам.
2. Получить приближенное аналитическое решение по определению рациональных параметров торцового элемента (ТЭ) и предельной нагрузки.
3. Получить приближенное аналитическое решение по определению толщины сферического свода, формирующегося в осесимметричных толстых плитах, опертых по конической поверхности, нагруженных равномерно распределенной статической нагрузкой.
4. Разработать аналитический метод расчета торцовых элементов со шпонками и без шпонок с силовой стенкой из тяжелого армоцемента.

5. Разработать численный метод расчета торцовых элементов со шпонками и без шпонок с силовой стенкой из тяжелого армоцемента по программе, основанной на методе конечных элементов (МКЭ).

Объект исследования – толстая осесимметричная бетонная плита, опертая по конической поверхности под действием равномерно распределенной нагрузки.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние и прочность торцовых элементов при статических воздействиях.

Научная новизна работы

1. Впервые на базе известного и исследованного ранее цилиндрического корпуса высокого давления (Г. Н. Шоршнев, В. И. Морозов) разработана аналитическая и численная методика расчета напряженного состояния торцовых элементов, при шпоночном и в случае с возможной подвижкой (без шпонок) вариантах сопряжении с несущей силовой стенкой из тяжелого армоцемента.

2. На основе аналитических и численных методов установлено, что торцовые элемента на шпонках в виде толстых осесимметричных плит работают и деформируются под нагрузкой качественно аналогично элементам коротким балок, испытывающим изгиб и срез.

3. На основе классической теории пластичности бетона и известных экспериментальных исследований (Г.С. Писаренко, В.М. Бурцев) разработана теоретическая модель торцового элемента при гладком сопряжении в виде формирующегося в процессе работы сжатого сферического купола, моделирующего работу толстой плиты в виде усеченного конуса.

4. Впервые приближенным способом получена формула по определению толщины, внутреннего и внешнего радиусов сферического свода при гладком сопряжении торцовых элементов с силовой несущей стенкой.

5. На основе известных критериев прочности бетона Баландина и Рихарда-Бранцага-Брауна получены решения задач по определению рациональных параметров, предельной нагрузки и напряжённого состояния торцовых элементов для КВД как при шпоночном, так и при гладком сопряжениях с возможной подвижкой.

Теоретическая значимость работы состоит в решении задачи о нарыженно деформированном состоянии и прочности торцовых элементов с учетом специфики поведения бетона в условиях сложного напряженного состояния, в том числе трехосного сжатия.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предлагаемых аналитических и численных методов расчета в практике проектирования корпусов высокого давления для энергетических, строительных и специальных технологий.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО СПбГАСУ при

подготовке специалистов по уникальным зданиям и сооружениям и магистров по направлению «Строительство».

Кроме того, прилагается справка о внедрении результата настоящих диссертационных исследований в ООО «ИНВЕСТИЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВО EVECON».

Методология и методы исследования. В работе использованы аналитические, численные и экспериментальные методы исследования, включающие построение расчетных схем рассматриваемых конструктивных элементов, их аналитический и численный анализ, сравнение полученных аналитических и численных результатов.

Личный вклад автора состоит в следующем: постановка задачи (совместно с научным руководителем), разработка расчетных моделей и программ, численной реализации методов расчета конструктивных элементов корпусов высокого давления, проведение расчетов, анализ и верификация полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На базе классической теории пластичности и известных экспериментальных исследований на моделях, обоснованно появления двух опасных сечений (1–1, 2–2, рис. 3) в железобетонных ТЭ со шпонками и сжатого сферического свода в бетонных ТЭ без шпонок в предельных значениях внешней нагрузки.

2. Аналитический расчет железобетонных торцовых элементов со шпонками с использованием критерия прочности бетона Баландина и Рихарда-Бранцага-Брауна.

3. Численный расчет железобетонных торцовых элементов со шпонками.

4. Сравнение результатов аналитического и численного расчетов торцовых элементов со шпонками.

5. Аналитический расчет торцовых элементов при возможной подвижке по наклонной поверхности несущей силовой стенки из тяжелого армоцемента с использованием критерия прочности бетона Баландина и Рихарда-Бранцага-Брауна.

6. Численный расчет торцовых элементов при возможной подвижке по наклонной поверхности несущей силовой стенки из тяжелого армоцемента.

7. Сравнение результатов аналитического и численного расчетов торцовых элементов при возможной подвижке по наклонной поверхности несущей силовой стенки из тяжелого армоцемента.

8. Заключение.

Достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается использованием известных положений современной теории пластичности бетона и железобетона, механики деформируемого твердого

тела, строительной механики, численных методов, согласием полученных аналитических и численных результатов расчета.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены на:

– 71-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2018 г.);

– 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2018 г.);

– 72-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2019 г.).

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно пунктам 1, 2 и 3.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе в 6 по списку ВАК и 1 по списку SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, основные результаты и выводы, список литературы из 106 источников. Объем диссертационного исследования составляет 133 страниц машинописного текста, в данный объем входят 71 страниц основного текста, содержащего 75 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам кафедры железобетонных и каменных конструкций и персонально заведующему лаборатории ЖБК, к. т. н. Э. К. Опбулу за помощь, оказанную в процессе работы над диссертацией.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы диссертации, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, которые составляют научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

В **первой главе** на основании изучения литературных источников, в том числе созданных такими учеными как: Берг О. Я., Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А., Комаровский А. Н., Дубровский В. Б., Жолдак Г. И., Корневский В. В., Зайцев Ю. В., Леонович С. Н., Шнайдер У., Карпенко Н. И., Кириллов А. П., Колчунов Вл. И., Колчунов В. И., Майлян Л. Р., Тимошенко С. П., Писаренко Г. С., Плевков В. С., Бондаренко В. М., Федоров В. С., Федорова Н. В., Шоршнев Г. Н., Морозов В. И., Жуков В. И., Соколов Б. С., Корсун В. И., Alberecht W., Anthony R. D., Drucker D. C., Prager W., Greenbourn G. A., Hannah J., Irving J., Carmichael

G., Korlsson B. J., Sozen M. A., Nervi P. L. и др. , и так или иначе затрагивающих изучаемую проблему, изложено состояние вопроса, дана динамика развития проектирования корпусов высокого давления и других конструкций, работающих в условиях сложных деформаций, нагрузок и воздействий.

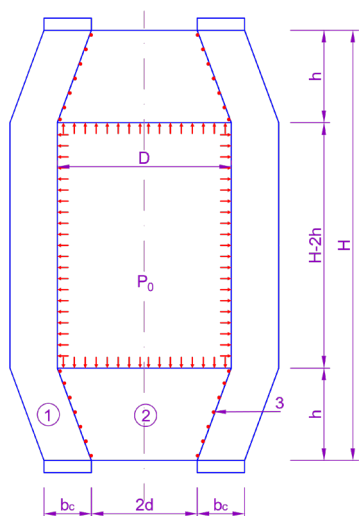


Рисунок 1. Расчетные
схемы КВД ЯР
1 – силовая стенка из ТАЦ;
2 – торцевой элемент;
3 – шпонки;
 P_0 – внутреннее давление

Для придания ТЭ формы «пробки» применяется металлическая несъемная опалубка. В связи с тем, что тангенциальные и радиальные напряжения распределяются по высоте плиты неравномерно (здесь принято их распределение в виде треугольника с основанием в нижнем сечении) в расчетную схему условно вводится переменная (эффективная) толщина опалубки также в виде треугольника (см. поз. 2 на рис.2).

Выполнено теоретическое обоснование аналитического метода расчета торцовых элементов при шпоночном сопряжении с силовой несущей стенкой корпуса, исключающего смещения по конической поверхности.

Рассматривается расчет конических толстых осесимметричных плит, в целях исключения вероятности смещения которых относительно стенки силового слоя предусмотрены специальные шпонки. Таким образом, рас-

Вторая глава посвящена аналитическим исследованиям торцовых элементов при шпоночной и гладком сопряжениях с несущей силовой стенкой корпуса из тяжелого армоцемента. Приводятся апробация аналитического метода расчетов на практических примерах.

Теоретическое обоснование аналитического метода расчета торцовых элементов при шпоночном сопряжении с силовой несущей стенкой корпуса, исключающего смещения по конической поверхности.

На рисунке 1 представлена оригинальная модель цилиндрического корпуса высокого давления ядерного реактора (КВД ЯР), испытанного под руководством профессора Шоршнева Г. Н.

На рисунке 2 представлено расчетное сечение торцового элемента (ТЭ) как толстой плиты, опирающейся на коническую поверхность силовой стенки и нагруженной давлением в виде равномерно распределенной нагрузки.

считается аналитическое решение задачи по определению предельного давления на толстую плиту, имеющую шарнирно-подвижное закрепление по вертикали и возможность смещения плиты в горизонтальном направлении.

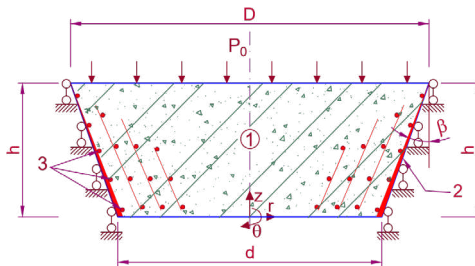


Рисунок 2. Расчетное сечение торцовых элементов 1 – ЖБ торцевой элемент; 2 – металлическая опалубка; 3 –кольцевые стержни

Ниже приводятся принятые предпосылки и допущения для создания аналитического метода расчета.

Известно по работам Г. Н. Шоршнева, В. М. Бурцева и В. И. Морозова, что при объемном деформированном состоянии при нагрузках, близких к предельным, в толстой осесимметричной плите с трещинами формируется достаточно большая область всестороннего сжатия.

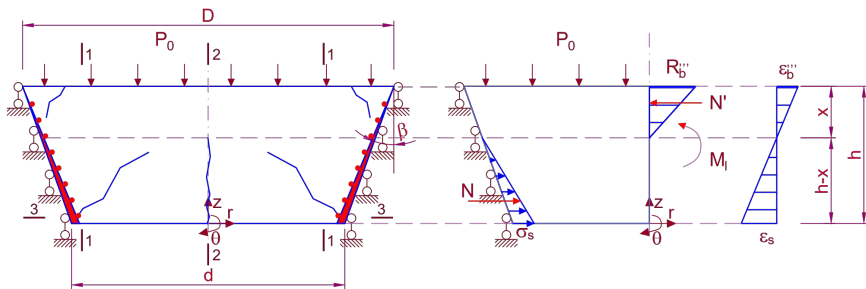


Рисунок 3. Расчетная схема нормального сечения толстого ЖБ элемента

Отметим, что эти принятые граничные условия будут действительны при решении задачи по определению напряженного состояния и прочности железобетонных торцовых элементов. С использованием условий равновесия всех внутренних сил ($\sum N = 0$ и $\sum M = 0$) на сечении 2–2 (рис. 3) и на основе гипотезы плоских сечений получена приближенная формула для предельной нагрузки с неизвестным параметром А:

$$P_0 = \frac{8}{3} \cdot \frac{\epsilon_b'' \cdot E_{red} \cdot A^2 \cdot h^2}{(A+1) \cdot d^2}, \text{ где } R_b'' = A^2 \cdot \epsilon_b'' \cdot E_{red}. \quad (1)$$

Расчет напряженного состояния ТЭ на основе теории пластичности выполним следующим образом.

Рассматривается осесимметрично деформируемая толстая плита.

С появлением первых трещин в нижней растянутой зоне толстой плиты, наступает стадия перехода балочной схемы работы в арочную в виде коротких балок.

Для вывода расчетных формул для напряженного состояния ТЭ используются два критерия прочности (Баландина и Рихарда – Бранцага – Брауна).

Определение напряженного состояния торцовых элементов с помощью критерия прочности Баландина.

Критерий прочности Баландина запишем в виде известной формулы:

$$\begin{aligned} & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - \\ & - (R_b - R_{bt})(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = R_b R_{bt} \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_\theta = \sigma_r$; $\sigma_3 = \sigma_z$ из (2) получим

$$(\sigma_r - \sigma_z)^2 - (R_b - R_{bt})(2\sigma_r + \sigma_z) = R_b R_{bt} \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения, σ_θ, σ_r - соответственно тангенциальные и радиальные напряжения, R_b, R_{bt} - соответственно предел прочности бетона при одноосном сжатии и растяжении.

С учетом выражении (3), получим:

$$\sigma_r = \sigma_z + M + \sqrt{M^2 + M\sigma_z + N}, \quad (4)$$

где $M = R_b - R_{bt}$; $N = R_b R_{bt}$.

Имеем следующие граничные условия (при $z = h$): $\sigma_z = P_0$ и $\sigma_r = \sigma_\theta = R_b''$, получаем:

$$R_b'' = P_0 + M + \sqrt{M^2 + M \cdot P_0 + N}. \quad (5)$$

Используя выражение (1) в формуле (5) получаем уравнение для параметра А:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{16} (\varepsilon_b'' \cdot E_{red})^2 d^4 \cdot A^2 \cdot (A+1) + \frac{4}{9} (\varepsilon_b'' \cdot E_{red})^2 \cdot h^4 \cdot A^4 \\ & - \frac{1}{3} (\varepsilon_b''' \cdot E_{red})^2 \cdot d^2 \cdot h^2 \cdot A^4 \cdot (A+1) - \frac{1}{8} \varepsilon_b'' \cdot E_{red} \cdot d^4 \cdot M \cdot A \cdot (A+1) \cdot \\ & - \frac{1}{6} \varepsilon_b''' \cdot E_{red} \cdot d^2 \cdot h^2 \cdot M \cdot A^2 \cdot (A+1) - \frac{1}{16} N \cdot d^4 \cdot (A+1)^2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) с неизвестным параметром А, достаточно просто решается с помощью программного пакета «Mathcad». Далее, с вычислен-

ным параметром А по формуле (1) определяется предельная нагрузка (P_0) на ЖБ ТЭ.

Определение напряженного состояния торцовых элементов на основе критерия Рихарда-Бранцага-Брауна.

Для определения прочности бетона при трехосном сжатии R_b'' используется критерий прочности Рихарда – Бранцага - Брауна:

$$R_b'' = R_b + k \cdot \sigma_0, \quad (7)$$

где k – коэффициент эффективности бокового давления; R_b – прочность бетона при одноосном сжатии; σ_0 – гидростатическое обжатие бетона.

Имеем следующие граничные условия (при $z = h$): $\sigma_z = P_0$ и $\sigma_r = \sigma_\theta = R_b''$, получаем: $\sigma_1 = \sigma_r = \sigma_\theta = R_b''$ и $\sigma_0 = \sigma_z = P_0$, тогда формула (7) примет вид

$$R_b'' = R_b + k \cdot P_0. \quad (8)$$

Используя выражение (1) в формуле (9) получаем уравнение для параметра А:

$$\varepsilon_b'' \cdot E_{red} \cdot d^2 \cdot A^2 \cdot (A+1) - \frac{32}{3} \cdot \varepsilon_b'' \cdot E_{red} \cdot h^2 \cdot A^2 - R_b \cdot d^2 \cdot (A+1) = 0. \quad (9)$$

Выражение (9) с неизвестным параметром А решается с помощью программного пакета «**Mathcad**» при $k = 4$. Значение k здесь принято таким в целях обеспечения дополнительного запаса прочности в стадии проектирования.

Далее, по формуле (1) определяется предельная нагрузка (P_0) на ЖБ ТЭ.

Далее рассматривается расчет осесимметричных толстых бетонных плит, опертых по конической поверхности. При этом контактная поверхность плиты и конической поверхности выполнена по скользящей схеме, которая допускает возможное смещение плиты по вертикали.

На рисунке 4 представлена толстая плита, в которой при действии равномерно распределенной нагрузки формируется толстый сферический свод.

Расчетные формулы для напряженного состояния торцовых элементов с возможной подвижкой также, по аналогии вышесказанного, выводятся с применением уже известных двух критериев прочности Баландина и Рихарда – Бранцага – Брауна.

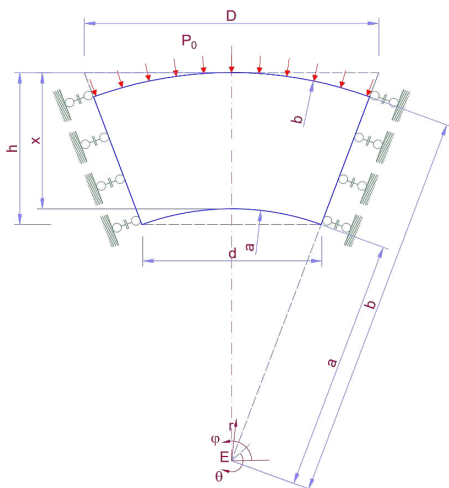


Рисунок 4. Геометрическое определение высоты (толщины) свода: x – толщина свода; a – внутренний радиус; b – внешний радиус

При этом толщина свода определяется схематично согласно рисунку 4, где точка E – пересечение наклонной поверхности с осью симметрии и считается центральной точкой сферического свода, при котором практически определяются неизвестные параметры свода a и b .

Определение напряженно-состояния торцовых элементов с помощью критерия прочности Баландина.

Можно допустить, что в данном случае характерные процессы (момент образования и развитие трещин, образование свода и т. д.) в большей степени будут зависеть от жесткости несущих стен из

ТАЦ. Допускаем, что в исследуемом варианте КВД жесткости конических участков стен из ТАЦ вполне достаточно для обеспечения совместной работы днища и стенок. При недостаточной по какой-либо причине жесткости несущих стен в конической части могут быть предусмотрены специальные бандажи.

Дифференциальное уравнение равновесия в сферической системе координат применительно к рассматриваемой задаче имеет вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (10)$$

С учетом выражений (3) и (10) получено трансцендентное уравнение, решение которого определяется численно

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \left(2 \cdot M + 2 \cdot \sqrt{M^2 + 3 \cdot M \cdot \sigma_r + N} \right), \quad (11)$$

где $M = R_b - R_{bt}$; $N = R_b R_{bt}$.

Имеем следующие граничные условия для сферы: при $r = a$, $\sigma_r = 0$ и при $r = b$, $\sigma_r = P_0$.

Далее на программном комплексе «**MathCad 15**» с разрешающей функцией «**Odesolve**» и с учетом принятых граничных условий и выраже-

ния (11), получим величину предельной нагрузки и напряжённое состояние торцовых элементов.

Определение напряженного состояния торцовых элементов на основе критерия Ф. Рихарда, А. Бранцаега и Р. Брауна.

Известно, что напряжения в сферическом своде $\sigma_1 = R_b''$ и $\sigma_0 = \sigma_3$ тогда формула (7) примет вид:

$$\sigma_1 = R_b + k \cdot \sigma_3. \quad (12)$$

Совместно решая (10) и (12), получаем предельное давление:

$$P_0 = \frac{R_b}{3} \cdot \left[\left(\frac{b}{a} \right)^6 - 1 \right]. \quad (13)$$

Приводится апробация аналитического метода на практических примерах.

Пример расчета торцовых элементов при сопряжении на шпонках и без таковых сопряжений с силовой несущей стенкой корпуса.

Исходные данные ЖБ ТЭ для бетона В40: прочность бетона при одноосном сжатии: $R_b = 29$ МПа; прочность бетона при одноосном растяжении: $R_{bt} = 2.1$ МПа; прочность бетона при двухосном сжатии принята $R_b'' = 42$ МПа, где определяется как $R_b'' = (1.4 \div 1.8) \cdot R_b = (40.6 \div 52.2)$ МПа; максимальная деформация бетона на сжатия $\epsilon_b'' = 0.0035$; армирования А500; угол наклона $\beta = 20^\circ$; для толстостенных ЖБ ТЭ, максимальный процент армирования $\mu_s = 4\%$. графически определяем расчетные параметры свода: $a = \frac{d}{2 \cdot \sin \beta}$ мм; $b = a \cdot \cos \beta + h$ мм.

Расчеты выполнены при следующих соотношениях параметров $\chi = \frac{d}{h} = 1, 1.5, 2, 2.25, 2.5$ (где расстояние $d = 2000$ мм – постоянный, высота элемента $h = 2000, 1333, 1000, 889, 800$ мм), заданы $\beta = 20^\circ$, μ (%).

Результаты расчета прочности ЖБ ТЭ при шпоночном сопряжении с использованием критерия прочности Баландина и Рихадара – Бранцаега – Брауна.

Для практического расчета напряженного состояния ЖБ ТЭ ($\sigma_r; \sigma_\theta$) используется решение уравнения (6), (9) и (1), результаты показаны в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты расчетов с использованием критерия Баландина

d/h	d (мм)	h (мм)	μ (%)	Высота сжатой зоны x (мм)	$\xi'''=x/h$	P ₀ МПа сечение 1-1	P ₀ МПа сечение 2-2
1	2000	2000	4	428	0.21	50.50	215.28
1.5		1333		399	0.30	33.67	54.38
2		1000		344	0.34	25.25	23.37
2.25		889		318	0.36	22.44	17.02
2.5		800		316	0.37	20.20	12.98

**Таблица 2. Результаты с использованием критерия
Рихарда – Бранцага – Брауна**

d/h	d (мм)	h (мм)	μ (%)	Высота сжатой зоны x (мм)	$\xi'''=x/h$	P ₀ МПа сечение 1-1	P ₀ МПа сечение 2-2
1	2000	2000	4	185	0.09	50.50	662.75
1.5		1333		264	0.20	33.67	108.07
2		1000		302	0.30	25.25	30.08
2.25		889		304	0.34	22.44	18.68
2.5		800		298	0.37	20.20	12.64

В целях обеспечения необходимой надежности зарубежные источники рекомендуют ограничиваться нормативными значениями $7 \div 10$ МПа. Разумеется, в расчетной практике необходимо предусматривать существенно высокие значения давления, так называемые запроектные воздействия. При этом из полученных расчетных данных приведенных в таблицах 1, 2 рациональным параметром является соотношение $d/h = 2$, так как величина предельной нагрузки в сечениях 1–1, 2–2 почти одинаковы по сравнению с другими значениями параметра d/h . При этом более близкие

данные показывает расчет, выполненный по критерию Баландина (25.25 и 23.37 МПа).

Ниже, приводится пример расчета напряженного состояния и прочности ЖБ ТЭ на основе критерия прочности бетона Баландина и Рихарда – Бранцага – Брауна с учетом вычисленного оптимального параметра

$$\chi = \frac{d}{h} = 2 \text{ (при } d = 2000 \text{ мм и } h = 1000 \text{ мм) в сечении 2-2.}$$

Полученные численные результаты расчета с использованием критерия Баландина: предельная нагрузка ЖБ ТЭ: $P_0 = 23.37$ МПа; высота сжатой зоны: $x = 344$ мм; тангенциальное и радиальное напряжения при $z = h$: $\sigma_\theta = \sigma_r = 87.86$ МПа.

Полученные численные результаты расчета с использованием критерия Баландина: предельная нагрузка ЖБ ТЭ: $P_0 = 30.08$ МПа; высота сжатой зоны: $x = 302$ мм; тангенциальное и радиальное напряжения при $z = h$: $\sigma_\theta = \sigma_r = 149.33$ МПа.

Результаты расчета прочности и напряженное состояние ТЭ при возможной подвижке с использованием критерия прочности Баландина и Рихадара-Бранцага-Брауна.

Для практического расчета напряженного состояния ТЭ ($\sigma_r; \sigma_\theta$), используется совместное решение уравнения (11) и (13), результаты показаны в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Результаты с использованием критерия Баландина

d/h	d (мм)	h (мм)	a (мм)	b (мм)	Высота сжатой зоны x (мм)	$\xi''' = x/h$	P_0 МПа
1	2000	2000	2925	4749	1824	0.91	83.34
1.25		1600	2925	4349	1424	0.89	64.18
1.50		1333	2925	4082	1157	0.87	51.44
1.75		1143	2925	3892	967	0.85	42.41
2.00		1000	2925	3749	824	0.82	35.71
2.25		889	2925	3638	712	0.82	30.56
2.50		800	2925	3549	624	0.78	26.48

**Таблица 4. Результаты с использованием критерия
Рихарда – Бранцаега – Брауна**

d/h	d (мм)	h (мм)	a (мм)	b (мм)	Высота сжатой зоны x (мм)	$\xi'''=x/h$	P ₀ МПа
1	2000	2000	2925	4749	1824	0.91	167.31
1.25		1600	2925	4349	1424	0.89	94.54
1.50		1333	2925	4082	1157	0.87	61.65
1.75		1143	2925	3892	967	0.85	43.94
2.00		1000	2925	3749	824	0.82	33.17
2.25		889	2925	3638	712	0.82	26.09
2.50		800	2925	3549	624	0.78	21.16

Таким образом, анализируя расчетные данные таблиц 3 и 4 выбираем оптимальные соотношения $\frac{d}{h} = 1.5 \div 2.5$ для проектирования ТЭ КВД ЯР, где $P_0 = 26.48 \div 51.44$ МПа.

Теперь, аналитически определяем напряженное состояние при следующих вычисленных параметров $\frac{d}{h} = 2$ и $d = 2000$ мм, $h = 1000$ мм, $\beta = 20^\circ$.

Для аналитического расчета на рисунке 5 представлена расчетная схема торцовых элементов с возможной подвижкой, когда формируется сферический свод.

Напряженное состояние торцовых элементов с использованием критерия прочности Баландина и Рихарда – Бранцаега – Брауна.

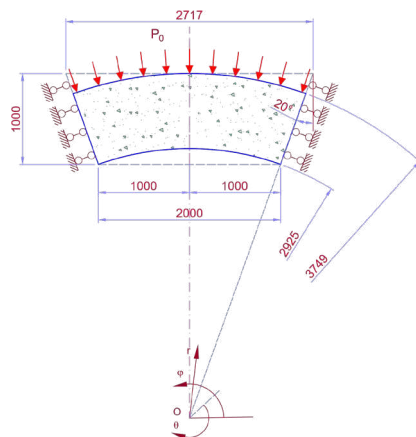


Рисунок 5. Расчетная схема торцовых элементов с возможной подвижкой

Соответственно с использованием критерия прочности Баландина и Рихарда – Бранцага – Брауна, величины максимального давления $P_0 = 35.71$ МПа и $P_0 = 33.17$ МПа. определены с помощью программы Math Cad.

На рисунке 6 приведены некоторые результаты решения задачи о НДС и прочности, выполненного на основе критериев Баландина и Рихарда – Бранцага – Брауна.

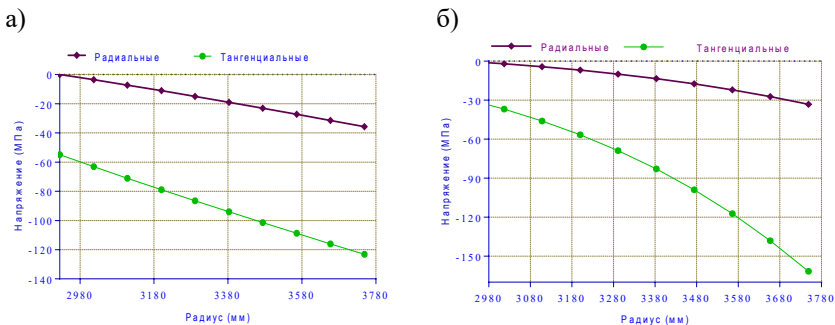


Рисунок 6. График зависимости тангенциальных и радиальных напряжений от радиуса свода: а) С использованием критерия прочности Баландина б) С использованием критерия прочности Рихарда – Бранцага – Брауна

Таким образом, выполнен аналитический расчет напряженного состояния и предельных нагрузок толстых плит, свободно опертых по конической поверхности. Полученные результаты показывают адекватность предлагаемой методики расчета.

Очевидно, создание аналитического метода расчета, полученного выше, необходимо, так как он позволяет в отдельных случаях проверять «на себе» правомерность использования численных методов, а кроме того качественно оценивать характер напряженного состояния элементов.

В *третьей главе* приводятся результаты численных исследований напряженного состояния торцовых элементов при действии внутреннего давления.

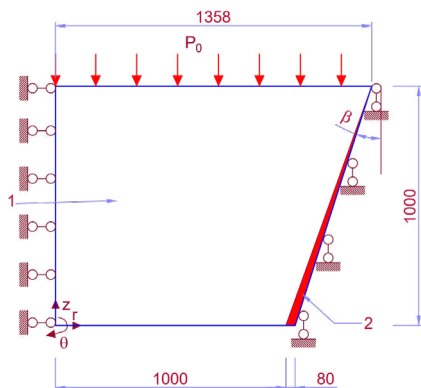


Рисунок 7. Расчетная схема ¼ ТЭ со шпонками КВД: 1 – бетон В40; 2 – слой армирования

Для численного анализа напряженного состояния торцовых элементов КВД при действии внутреннего давления в виде равномерно распределенной нагрузки был выбран программный комплекс ANSYS.

Так как рассматриваемая конструкция является осесимметричной, а действующая нагрузка – равномерно распределенной, то в численном методе ANSYS принята $\frac{1}{4}$ модель 3D.

Формирование расчетной схемы на базе конечно-элементной модели в программном комплексе ANSYS.

Для создания расчетной схемы на базе конечно-элементной модели принимается цилиндрическая система координат, представленная на рисунке 7 где: r, θ, z – соответственно радиальная, тангенциальная и вертикальная оси элемента.

Исходные данные для численного расчета торцовых элементов. Бетон класса В40: $R_b = 29$ МПа, $R_{bt} = 2.1$ МПа, $d = 2000$ мм, $h = 1000$ мм, $E_b = 36000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.18$. Арматура А500.

Далее предпринята попытка учета влияния двухосного сжатия на прочность бетона. В данном случае в качестве количественного результата, свидетельствующего о повышении прочности бетона в условиях двухосного сжатия, принято предложение Н. И. Карпенко, согласно которого для бетона класса В40 получим значение $R_b^* = 42$ МПа.

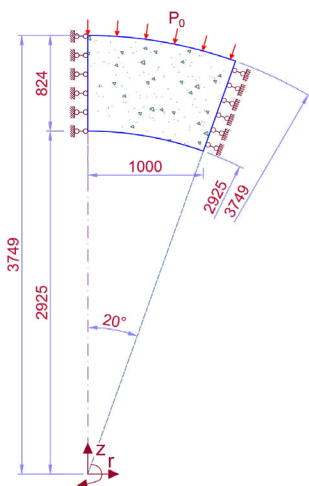


Рисунок 8. Расчетная схема торцовых элементов без шпонок в виде свода

Нагрузки в соответствии с табл. 1 и 3 в случае со шпонками принято 23.37 МПа, а с подвижкой 35.71 МПа.

На рисунке 8 представлена расчетная схема торцовых элементов с возможной подвижкой в виде свода. Сопряжение торцовых элементов с наклонной частью силовой стенки в данном случае, рассматривается как на трении и коэффициент трения принят равным нулю ($f = 0$).

Кроме того, были выбраны расчетные критерии прочности бетона (критерии Друкера-Прагера), а также были известны прочностные свойства бетона при многоосном сжатии.

Ниже приводятся результаты численных расчетов, выполненных на базе МКЭ для программного комплекса ANSYS. При этом результаты расчетов представлены в виде $\frac{1}{4}$ 3D моделей, представлены изополя напряжений, таблицы и графики.

Результаты численных расчетов при шпоночном сопряжении.

На рисунке 9а представлены изополя радиальных напряжений. где по знаку можно определить зоны растяжения и зоны сжатия.

На рисунке 9б представлены изополя касательных напряжений. По точкам максимальных касательных напряжений можно производить необходимое армирование элемента на срез.

а)

A: ШПОНКИ

Радиальное напряжение

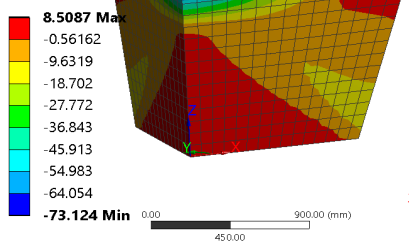
Type: Normal Stress(X Axis)

Unit: MPa

Coordinate System

Time: 5

13.04.2019 12:25



б)

A: ШПОНКИ

Shear Stress

Type: Shear Stress(XZ Plane)

Unit: MPa

Coordinate System

Time: 5

13.04.2019 12:25

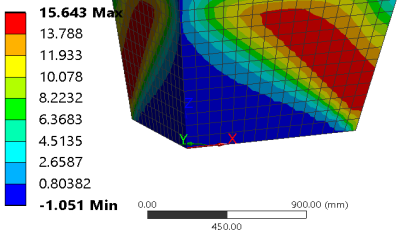


Рисунок 9. Изополя радиальных и касательных напряжений

Результаты численных расчетов ТЭ при возможной подвижке.

а)

C: СВОД-ТРЕНИЕ

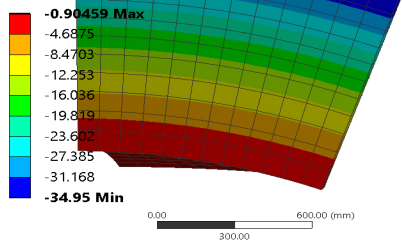
Maximum Principal Stress

Type: Maximum Principal Stress

Unit: MPa

Time: 8

19.04.2019 11:36



б)

C: СВОД-ТРЕНИЕ

Minimum Principal Stress

Type: Minimum Principal Stress

Unit: MPa

Time: 8

19.04.2019 11:36

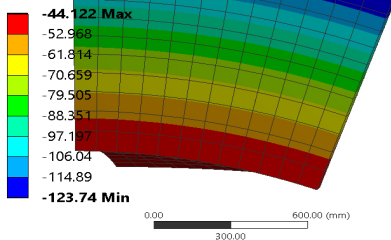


Рисунок 10. Изополя напряжений в ТЭ: а) максимальное, б) минимальное

На рисунке 10 представлены изополя максимальных и минимальных напряжений.

На рисунке 11 представлен график зависимости радиальных и тангенциальных напряжений от расстояния на оси симметрии ТЭ.

На базе МКЭ в рамках программного комплекса ANSYS разработаны оригинальные расчетные схемы, характеризующие поведение ТЭ в зависимости от наличия или отсутствия шпонок.

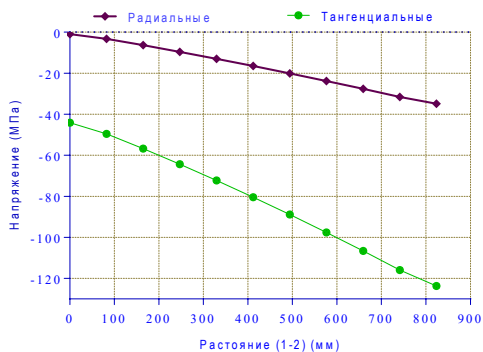


Рисунок 11. График зависимости радиальных и тангенциальных напряжений от расстояния на оси симметрии ТЭ

Четвертая глава посвящена сравнению результатов расчета ТЭ аналитическими (гл.2) и численным (гл.3) методами.

Ниже приводятся сопоставления результатов расчетов, свидетельствующие об удовлетворительном в целом согласии.

Известно, что в ЖБ ТЭ со шпонками возникают растянутая и сжатая зоны, которые характерны для балочных конструкций. Когда элементы работают по балочной схеме, то возникает необходимость армирование их растянутой зоны.

Результаты расчета, напряженного состояние ЖБ ТЭ со шпонками представлены на рисунке 12, при этом сравнение выполняется по радиальным напряжениям.

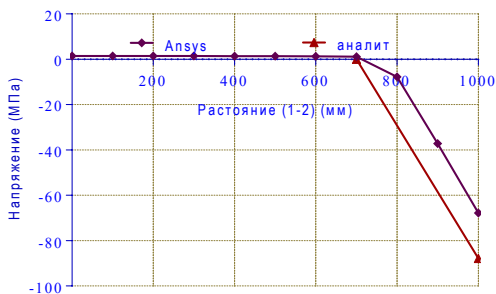


Рисунок 12. График зависимости радиальных напряжений от расстояния на оси симметрии

Сравнение результатов напряженного состояния ТЭ с возможной подвижкой.

В аналитическом методе используются сферические координаты r, θ, ϕ (см. глава 2), а в численном — цилиндрические r, θ, z (см. глава 3). Заметим, что в данном случае на оси симметрии оси r и z совпадают.

На рисунках 13 и 14 представлены результаты расчетов вертикальных и радиальных напряжений в зависимости от расстояния на оси симметрии ТЭ с возможной подвижкой. Можно заметить, что выполненные расчеты на основе критерия прочности бетона Баландина, и численного метода на основе критерия Друкера – Прагера с МКЭ дают хорошие результаты.

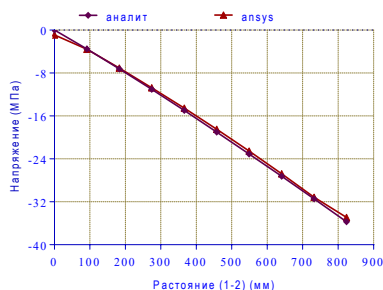


Рисунок 13. График зависимости вертикальных напряжений

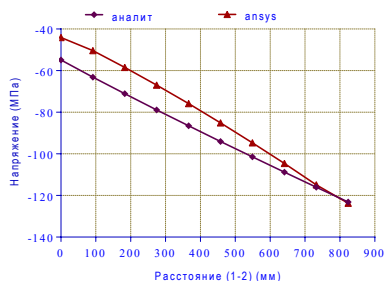


Рисунок 14. График зависимости радиальных напряжений

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты, проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при шпоночном соединении ТЭ с несущей стенкой обязательно применение арматуры, так как элементы работают по схеме качественно аналогично элементам коротких балок, испытывающим изгиб и срез. В случае без шпоночного сопряжения, элементы оказываются целиком сжатыми, при этом характерно работа элементов на подобие «пробки», и нет необходимости их армирования.

2. Известно, что ТЭ КВД и нагрузки, действующие на них, обладают осевой симметрией и поэтому при аналитических и численных исследованиях задача по оценке НДС может рассматриваться в рамках осесимметричной задачи. Обнаружено, что прочность ТЭ со шпонками и без таковых зависит от многих факторов: прочностные свойства материалов, геометрические параметры, процент армирования, жесткость несущей силовой стенки.

3. В общем случае ЖБ ТЭ со шпонками, то есть при наличии арматуры и в зависимости от геометрии «пробки», может возникать два опасных сечения, которые обуславливают возможность разрушения от среза и (или) изгиба. В этой связи, предельное состояние ЖБ ТЭ наступает в одном из двух сечениях, при этом в стадии проектирования важно ограничиться с несущей способности того сечения, у которого прочность ниже.

4. Результаты аналитических расчетов (см. табл. 1 и 2) показывают, что с увеличением величины отношения d/h уменьшается прочность (пре-

дельная нагрузка) расчетных сечений (1–1, 2–2). Оптимальное отношение параметров обнаруживается при $d/h = 2$, при этом прочность обоих расчетных сечений (1–1, 2–2) почти одинаковы.

5. В бетонных ТЭ без шпонок характерно появление сферического свода, и для расчета могут быть использованы уравнение теории упругости в сферических координатах, а в качестве критерия прочности бетона рекомендуются критерии Баландина, либо Рихарда-Бранцага-Брауна, которые удовлетворительно согласуются с опытными данными, выполненными другими авторами.

6. В осесимметричных конструкциях толстых плит, оснащенных шпонками, с увеличением нагрузки высота сжатой зоны на оси симметрии элемента, меняется не существенно. В этом случае в средней части нижней поверхности плиты и в верхних угловых зонах возникают растягивающие напряжения.

7. Для ТЭ характерна расчетная схема, аналогичная свободно лежащей на двух опорах балки. При этом установлено, что поведение ЖБ ТЭ со шпонками практически не влияет на напряженное состояние несущей стенки в горизонтальном направлении. В этом случае нет необходимости наращивания толщины несущей силовой стенки из ТАЦ с целью увеличения несущей способности стенки. В случае же без шпонок необходима высокая жесткость несущей силовой стенки из ТАЦ. Для этого может потребоваться достаточно жесткая несущая стенка, либо требуется усиление несущей стенки вблизи торца с помощью специального устройства типа «бандажа».

8. Численный эксперимент, выполненный в диссертации на базе критерия прочности бетона Друкера – Прагера в рамках программного комплекса ANSYS, обнаружил удовлетворительное согласие полученных результатов с данными аналитического расчета на базе критерия Баландина.

9. Выполненные в диссертации исследования не исчерпывают всех проблем при создании надежных КВД со стенами из ТАЦ и торцовыми элементами наподобие пробок, однако уже на данном этапе исследований полученные теоретические результаты дают возможность определиться с габаритами и геометрией торцовых элементов, а также с выбором варианта сопряжения стенок и днищ на стадиях эскизного и технического проектов. Дальнейшие исследования, по нашему мнению, целесообразно направить на решение вопросов оптимизации конструктивных решений торцовых элементов, в том числе с учетом использования фибрового и (или) регулярного армирования, что при наличии технологических проходов, устраиваемых в днищах, будет необходимым.

Перспективой дальнейшей разработки данной темы является изучение напряженного состояния торцовых элементов корпусов высокого давления с учетом компенсатора, устанавливаемых в угловых зонах корпуса с целью погашения пиковых напряжений.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Фук Ф. В.**, Морозов В. И., Опбул Э. К. Особенности напряженно-деформированного состояния торцовых элементов в виде толстых конических плит корпусов высокого давления // Вестник гражданских инженеров. 2017. Т. 63, № 4. С. 87–92.

2. **Фук Ф. В.**, Морозов В. И., Опбул Э. К. К расчету толстых конических плит на действие равномерно распределенной нагрузки // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 67, № 2. С. 66–73.

3. **Фук Ф. В.** Расчет осесимметричных толстых плит, свободно опертых по конической поверхности (с возможной подвижкой) // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 68, № 3. С. 47–53.

4. **Фук Ф. В.** Морозов В. И., Опбул Э. К. Напряженное состояние и прочность торцевых элементов, опертых по конической поверхности корпусов высокого давления // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 69, № 4. С. 28–35.

5. **Фук Ф. В.** Напряженное состояние и прочность толстостенных бетонных сферических оболочек при равномерном внешнем давлении // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 71, № 6. С. 19–24.

6. **Фук Ф. В.**, Морозов В. И., Опбул Э. К. Прочность железобетонных торцовых элементов корпусов высокого давления // Вестник гражданских инженеров. 2019. Т. 75, № 4. С. 29–37.

Публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus:

7. **Phuc P. Van**, Morozov V. I., Opbul E. K. Behaviour of axisymmetric thick plates resting against conical surface // Magazine of Civil Engineering. 2019. Т. 86, № 2. С. 92–104.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 21.10.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 126.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

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