

На правах рукописи



ЦИМБЕЛЬМАН НИКИТА ЯКОВЛЕВИЧ

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАПОЛНЕННЫХ ГРУНТОМ ОБОЛОЧЕК**

Специальность 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика
и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург-2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)

- Научный консультант: **Беккер Александр Тевьевич**, доктор технических наук, профессор, действительный член РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор акад. департамента Морских арктических технологий, научный руководитель Политехнического института (Школы) ДВФУ
- Официальные оппоненты: **Гарибин Павел Андреевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Гидротехнических сооружений, конструкций и гидравлики Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.
- Королев Константин Валерьевич**, доктор технических наук, профессор и заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».
- Лалин Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
- Ведущая организация **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ).**

Защита состоится «8» декабря 2023 г. в 10:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 72.1.003.01 на базе акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

E-mail: ivanovaty@vniig.ru, тел. +7 (812) 493-93-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте www.vniig.rushydro.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Иванова Татьяна Викторовна

Актуальность темы исследования. Задачи развития портового и шельфового строительства, такие как общее увеличение причального фронта и полезных территорий портов, в том числе реконструкция существующих и возведение новых портовых сооружений (набережных, пирсов, палов, молов, волноломов и др.), формирование подпорных сооружений искусственных территорий, формирование искусственных островов, устройство грунтовых оснований стационарных шельфовых нефтегазодобывающих платформ составляют далеко не полный перечень задач гидротехнического строительства (ГТС) в рамках государственных программ развития морской портовой и транспортной инфраструктуры.

В последние десятилетия в практике строительства всё более широко применяются комбинированные несущие конструкции, направленные на эффективное использование положительных свойств составляющих их элементов. Элементы могут быть весьма различны по свойствам, но при этом рациональное их сочетание приводит к высокой эффективности и экономичности конструкции.

Примером является распространение проектных решений с применением заполненных грунтом оболочек, в которых сочетаются свойства оболочки и удерживаемого ею наполнителя. Относительно дешёвый наполнитель занимает более 90 % объёма сооружения, и во взаимодействии с оболочкой образует несущую конструкцию, применяемую в составе гидротехнических сооружений различного назначения. Применение в ГТС тонких оболочек, внутренней средой для которых является грунтовый наполнитель, формирует круг проблем, связанных с недостаточной проработкой расчётного обоснования конструкции, а также технических, технологических и конструктивных решений, направленных на её применение. Актуальной остаётся проблема расчёта напряжённо-деформированного состояния гидротехнических сооружений из тонких оболочек с грунтовым наполнителем, в том числе обоснование условий взаимодействия их элементов, а также моделирования и обеспечения передачи нагрузки от оболочечной конструкции на грунтовое основание.

Объектом исследований являются тонкие оболочки, частично заглубленные в грунт основания и обеспечивающие цельность конструкции гидротехнических сооружений различного назначения за счёт удерживаемого в проектном положении грунта наполнителя.

Предмет исследования – напряжённо-деформированное состояние конструкций из оболочек с наполнителем в составе системы «гидротехническое сооружение – основание».

Диссертационное исследование проведено в период с 2010 года, в том числе в рамках исполнения плана фундаментальных научных исследований при реализации **государственной программы "Научно-технологическое развитие Российской Федерации"** (НИР 3.1.1.13., 2021÷2023 г.г.), и плана реализации **государственной программы "Развитие науки и технологий"** (НИР 7.4.17., 2020 г., НИР 7.1.19., 2013 г.).

Степень разработанности темы исследования. Основы теории оболочек заложены начиная с 40-х годов XX века в работах В.З. Власова, А.Л. Гольденвейзера, Б.Н. Жемочкина, Н.Н. Леонтьева, В.В. Новожилова, К. Терцаги (Terzaghi K.), С.П. Тимошенко, А.П. Филина и др., и далее развиты применительно к различным обла-

стям деятельности. Теоретические основы решения задач статики и динамики оболочек, в том числе связанных с упругим деформируемым телом, представлены исследованиями А.П. Варвак, М.З. Гатауллина, В.Б. Глаговского, Б.В. Гулина, Р.М. Зарипова, В.А. Иванова, М.А. Ильгамова, В.В. Лалина, Г.И. Маркелова, З.Л. Нарузберг, Б.М. Пелех, В.В. Пикуля и др. Теоретическое обоснование основных расчётов оболочек с наполнителем развито в работах В.Л. Бидермана, В.А. Елтышева, С.Н. Кана, А.А. Поливанова, К.Ф. Шагивалеева и других авторов. В области гидротехнического строительства значительный вклад в разработку методов расчёта оболочечных конструкций внесли отечественные и зарубежные исследователи: В.О. Алмазов, А.Т. Беккер, Г.Е. Бимбад, Т. Бозки (Т. Voeki), В.В. Верстов, П.А. Воронов, В.Б. Гуревич, Н.Н. Кайдалов, Е. Кюмминг (E.Cumming), С.Н. Левачёв, В.П. Лихачёв, С.В. Лузан, Х. Мазьяд, М.Ю. Николаевский, В.И. Николау, Н. Овесен (N.Ovesen), М.Э. Плакида, В.И. Селивёрстов, А.Я. Серебро, М. Сираси (M.Shirashi), Г.Н. Смирнов, В.И. Титова, И.В. Фёдоров, Г.Д. Хасхачих, Г. Шнибелли (G.Schneebelli), П.И. Яковлев и др. Вопросы исследования взаимодействия опорных частей гидротехнических сооружений с грунтовым основанием проработаны в трудах К. Андерсена (K. Andersen), Е.Н. Беллендира, В.Г. Березанцева, М.А. Бурмистрова, В.Б. Глаговского, М.Е. Грошева, Г.А. Дубровы, М.Х. Дэвис, Ю.К. Зарецкого, А.З. Зархи, П.Л. Иванова, В.М. Кириллова, Г.К. Клейна, К.В. Королёва, А.Л. Крыжановского, М. Куделла (M.Kudella), А.Я. Медведева, Е.М. Перлей, К. Ронольда (K. Ronold), В.И. Руденко, О.М. Финагенова, О. Ханстина (O. Hansteen), А.И. Царёва и других.

Анализ исследований и опыта применения оболочечных конструкций показывает актуальность направления разработки и развития методов расчётного моделирования тонких оболочек с грунтовым наполнителем на сжимаемом основании, обеспечивающих возможность применения экономичных комбинированных конструкций для устройства широкого спектра сооружений как в гидротехническом строительстве, так и при решении задач вертикальной планировки местности в смежных областях строительства.

Цель работы: разработка научно обоснованной методики расчётного моделирования, технических и технологических решений тонких оболочечных конструкций с грунтовым наполнителем в составе системы «гидротехническое сооружение – основание», применяемых при возведении гидротехнических сооружений различного назначения и условий эксплуатации. В соответствии с поставленной целью, направленной на расширение области применения заполненных грунтом оболочек, сформулированы следующие **задачи** исследований:

1. Провести анализ отечественного и зарубежного опыта исследований, строительных норм, регламентирующих этапы расчёта, проектирования, возведения и эксплуатации гидротехнических сооружений из оболочек с наполнителем; обозначить традиционную область их применения.

2. Классифицировать сооружения из заполненных грунтом оболочек по способу взаимодействия с основанием с целью определения основных расчётных схем, учитывающих как размеры конструкции и действующие нагрузки, так и физико-механические свойства грунтового основания.

3. Определить влияние геометрических и физико-механических параметров системы «оболочка-наполнитель-основание» на основную расчётную модель сооружения из заполненных оболочек.

4. Обосновать возможности и обозначить область применения технической теории оболочек для решения рассматриваемой задачи определения усилий и перемещений внецентренно нагруженной заполненной грунтом тонкой оболочки.

5. Разработать математическую базовую модель описания взаимодействия тонкой оболочки с внутренним наполнителем и основанием для условий статического и динамического нагружения, с применением современных методов вычислений, реализованных в программно-вычислительных комплексах.

6. Разработать методику трёхмерного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «оболочка-наполнитель-основание», отражающую этапы построения модели гидротехнического сооружения и формирование стадий расчёта в соответствии с особенностями его нагружения и технологии возведения.

7. Провести необходимый объём экспериментальных исследований поведения рассматриваемой системы при статических и динамических нагрузках с целью калибровки базовой математической модели с учётом описания условий на контакте оболочки с наполнителем.

8. Разработать методику расчёта гидротехнических сооружений из заполненных оболочечных конструкций на основе анализа совместной работы оболочки, среды внутреннего наполнителя и основания, с учётом внешних воздействий и особенностей опирания.

9. Разработать и исследовать конструктивные решения, позволяющие обеспечить эффективную совместную работу элементов конструкции гидротехнических сооружений из заполненных грунтом оболочек в зоне опирания на грунтовое основание.

10. Разработать технические решения в части технологии возведения гидротехнических сооружений из заполненных грунтом оболочек, эффективно использующие особенности работы материала наполнителя и оболочки и направленные на расширение области их применения.

11. Исследовать возможность и предложить технические решения для применения конструкций из заполненных грунтом оболочек как несущих конструкций в смежных областях строительства (транспортном, промышленном, гражданском).

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые разработана аналитико-численная модель взаимодействия тонкой цилиндрической оболочки с наполнителем и сжимаемым основанием в составе гидротехнического сооружения, сформированная с использованием положений технической теории оболочек и методов численного моделирования.

2. Разработана и апробирована новая методика экспериментального определения параметров модели контакта грунтового наполнителя с поверхностью оболочки.

3. Получены новые опытные данные о характере и особенностях работы заполненной грунтом оболочки, как несущей основы гидротехнического сооружения при статическом и динамическом нагружении.

4. Впервые проведена валидация численной расчётной модели заполненной оболочки в части анализа картины распределения напряжений в элементах системы «гидротехническое сооружение-основание».

5. На основе исследований предложенной расчётной модели впервые установлен диапазон эффективных соотношений размеров оболочки с учётом деформационных свойств наполнителя из условия оптимальности распределения усилий в оболочке.

6. Разработана новая теоретическая модель, функционально связывающая параметры элементов системы «гидротехническое сооружение-основание» с максимальной нагрузкой, которую сооружение воспринимает без потери несущей способности основания.

7. Впервые разработана классификация расчётных моделей внецентренно-нагруженных гидротехнических сооружений из заполненных оболочек по способу взаимодействия с основанием с учётом его механических свойств.

8. Разработан алгоритм трёхмерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «оболочка – наполнитель – основание».

9. Предложена и апробирована последовательность расчёта гидротехнического сооружения, состоящего из внецентренно-нагруженных заполненных грунтом оболочек, опирающихся на грунтовое основание.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории расчёта конструкций, образуемых сыпучим телом, удерживаемым тонкой оболочкой в проектном положении в составе гидротехнических сооружений различного назначения. Система разработанных математических моделей описания взаимодействия тонкой оболочки с внутренним наполнителем с учётом работы грунтового основания образует основу методики расчётного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «оболочка-наполнитель-основание». Результаты исследований внесут вклад в области численного и физического моделирования гидротехнических сооружений в составе сложных расчётных систем, а также в области научного обоснования расчётного моделирования сооружений, в которых среда наполнения оболочек используется в качестве конструкционного материала.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующих положениях, применённых при расчёте и проектировании объектов ГТС (перечислены в разделе «Внедрение результатов исследований»):

1. Сформирована инженерная методика, предназначенная к применению в процессе проектирования, расчёта и конструирования гидротехнических сооружений, выполненных из заполненных оболочек, в том числе планируемых к возведению в регионах со сложными климатическими условиями.

2. Разработанная классификация внецентренно-нагруженных сооружений из заполненных оболочек позволяет осуществить предварительный выбор расчётной схемы сооружения с учётом как габаритов конструкции и действующих нагрузок, так и физико-механических свойств грунтового основания.

3. Разработан алгоритм построения численной модели гидротехнического сооружения из заполненных оболочек; выполнена адаптация инженерных методик определения нагрузок применительно к заполненным оболочкам, в т. ч. разработана инженерная методика последовательного моделирования циклического приложения ледовой нагрузки. Методики предназначены к использованию при отсутствии соответствующего программного инструмента при формировании численных моделей, либо как альтернатива для их проверки.

4. Предложен способ учёта демпфирующих свойств системы «оболочка-наполнитель-основание» при формировании расчётных динамических моделей сооружений из заполненных оболочек, основанный на назначении расчётного частотного диапазона, и позволяющий определить коэффициенты Релея при заданном уровне демпфирования грунта.

5. Разработанные теоретические положения в отношении устойчивости оболочек с наполнителем при взаимодействии с грунтовым основанием реализованы в виде программы для персонального компьютера (св-во № 2020618170 от 21.07.2020). Использование программы на ранних стадиях расчёта позволяет осуществить выбор комбинации основных параметров рассматриваемой системы «гидротехническое сооружение-основание». Разработанная теоретическая модель применяется также для целей верификации численных расчётов.

6. Предложена рациональная схема установки оболочек в состав протяжённого гидротехнического сооружения с учетом характера распределения напряжений и деформаций в основании сооружения.

7. В результате исследований разработан способ повышения устойчивости сооружений из заполненных оболочек введением опорной консоли (патенты 2463408 РФ, 109158 РФ); решена задача определения оптимальной ширины опорной консоли с учётом распределения напряжений в основании заполненной оболочки; предложены и обоснованы новые технические решения и технологические приёмы монтажа конструкции (патенты 2700833 РФ; 184231 РФ; 2619646 РФ; 2623419 РФ; 166863 РФ).

8. Обоснованные в результате работы методики могут быть также внедрены в качестве обособленных расчётно-проектных блоков в существующие и вновь создаваемые отечественные программы и программные комплексы, содержащие как теоретические зависимости для описания работы материалов и конструкций, так и элементы численного моделирования гидротехнических сооружений.

Методология и методы исследования.

Исследования проведены с соблюдением основных традиционных этапов классической постановки научной работы. Выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта исследований. При формировании моделей использованы современные достижения прикладной математики и строительной механики в области развития численных методов оценки напряжённо-деформированного состояния расчётных систем при статических и динамических нагрузках. Предлагаемые приближённые модели калиброваны в результате экспериментальных исследований и верифицированы сопоставлением с более строгими математическими решениями, возможными для определённых расчётных условий. Планирование эксперимента выполнено с соблюдением положений теории подобия и анализа размерностей.

Положения, выносимые на защиту.

1. Расчётно-экспериментальное обоснование применения заполненных грунтом тонких оболочек в составе гидротехнических сооружений, включающее постановку и реализацию численного решения задачи, разработанного с учётом технической теории оболочек, методику моделирования и численную модель описания взаимодействия оболочки с наполнителем и основанием для широкого диапазона граничных условий.

2. Методика экспериментального определения параметров модели контакта наполнителя с поверхностью оболочки; новые результаты экспериментальных исследований сооружений из заполненных грунтом оболочек при действии статических и динамических нагрузок.

3. Результаты сопоставительного анализа теоретических и экспериментальных данных при внецентренном нагружении заполненной грунтом оболочки, в котором получены удовлетворительные данные об эффективности предложенных моделей.

4. Теоретическая модель, функционально связывающая параметры грунта основания и конструкции заполненной оболочки с максимальной нагрузкой, воспринимаемой сооружением без потери несущей способности основания.

5. Результаты прикладных исследований как обоснование новых технических и технологических решений изготовления и монтажа оболочечных конструкций с грунтовым наполнителем для различных условий применения.

6. Диапазон эффективного соотношения основных размеров заполненной оболочечной конструкции в зависимости от деформационных свойств материала оболочки и материала наполнителя по критерию оптимального распределения усилий в конструкции.

7. Классификация и признак классификации сооружений из заполненных грунтом оболочек, отражающие характер взаимодействия конструкции с грунтовым основанием (оценка составляющей удерживающего момента на уровне подошвы, обеспечиваемого собственным весом сооружения).

8. Алгоритм и практическая методика расчёта гидротехнических сооружений из внецентренно-нагруженных заполненных грунтом оболочечных конструкций различной формы и компоновки при статических и динамических нагрузках.

Достоверность результатов исследований обеспечивается корректным применением положений технической теории оболочек, используемых теорий механики деформированного твёрдого тела и теории предельного напряжённого состояния сыпучих и связных сред. Выводы и положения методик подтверждаются необходимым объёмом экспериментальных исследований с использованием современного сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования; удовлетворительной сходимостью результатов расчётно-теоретических исследований с данными экспериментов.

Личный вклад автора. Автору принадлежит постановка задач исследований, разработка логики исследований и содержания разделов работы, осуществление исследований, том числе в части теоретических и экспериментальных разделов работы, организация и проведение вспомогательных работ, а также анализ, организация обсуждений и представление полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на конференциях, симпозиумах и семинарах во Владивостоке (2012, 2016, 2023), Пусане (Ю. Корея, 2014), Санкт-Петербурге (2014, 2019, 2022, 2023), Томске (2015), Южно-Сахалинске (2018), Москве (2021, 2022) и др.

Внедрение результатов исследований. Практические рекомендации и расчётно-теоретические положения, полученные в результате исследований, использованы в рамках Научно-технического сопровождения проектирования и строительства уникального объекта «Строительство Судостроительной верфи «Звезда» (б. Большой Камень): при проектировании перемычки котлована Сухого дока, проведении поверочных расчётов достроечной (№1), грузовой и мелководной набережных (в период с 2017 по 2022 годы).

Результаты исследований применены при выполнении расчётов и проектировании грузопассажирского пирса в составе сооружений проекта «Научно-образовательный комплекс «Приморский океанариум» (Владивосток); при расчёте конструкций причала на о. Беринга (с. Никольское); береговой паромной переправы «Ванино-Холмск» (в морском порту Холмск); причала №2 лесозаготовительного пункта «Самаргинский»; конструкций слипа в б. Нарва; причала № 44 в порту Владивостока; укреплении русел ручьёв и рек на трассе Владивосток – Порт Восточный, а также при расчёте и проектировании сооружений транспортной инфраструктуры: устоев мостов и подпорных сооружений (более 20 объектов).

Отдельные результаты работы представлены к внесению в СП 35.13330, СП 46.13330 «Мосты и трубы» (редакция 2023 г., ТК 465), представлены предложения в ТК 506 к внесению в СП 381.1325800 «Сооружения подпорные. Правила проектирования».

Публикации. Основные результаты работы представлены в более чем 60 работах в научных журналах, материалах конференций и симпозиумов, среди них: 19 – из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук; 16 – публикации, рецензируемые базой данных Web of Science (Core Collection) и базой данных Scopus; 10 – патенты на изобретения и полезные модели; одно свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 376 страницах машинописного текста, включающего 196 рисунков, 32 таблицы, список литературы из 376 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень проработанности; обозначены объект и предмет исследования; поставлена цель исследований и сформулированы задачи, требующие решения для достижения цели; приведена структура диссертации; сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов и обоснование степени их достоверности;

приведена информация об апробации работы, реализации и внедрении результатов, о личном вкладе автора; представлены положения, выносимые на защиту и их соответствие паспорту научной специальности.

В первой главе приведён анализ причин появления и развития в гидротехническом строительстве проектных решений с применением заполненных грунтом оболочек, охарактеризована работа основных элементов конструкции, обозначены основные отличительные черты конструкции и её преимущества.

Принцип формирования заполненной оболочки как несущей конструкции состоит в удержании массива наполнителя в заданной проектной форме, образуемой тонкой наружной оболочкой, выполненной из прочного материала. При условии обеспечения эффективной совместной работы оболочки и удерживаемого ею наполнителя конструкция обладает рядом значительных преимуществ. Во-первых, обеспечивается сравнительно равномерное распределение усилий от внешних нагрузок, что приводит к рациональной работе обоих основных элементов конструкции. Во-вторых, при рациональном конструировании совместная работа тонкостенных оболочек с наполнителем обеспечивает значительное снижение расхода конструкционных материалов. В-третьих, для большой группы сооружений возникает возможность и целесообразность их эксплуатации за пределами упругой области деформаций.

В результате расширение области применения оболочечных конструкций с наполнителем объясняется рядом естественных причин:

- экономичность конструкции. Сравнительно дорогой конструкционный материал используется преимущественно для оболочки: для стальных конструкций – до 1% от общего объёма конструкции, до 10% при применении железобетона;
- «живучесть» конструкции. Возможность перераспределения усилий в наполнителе в процессе эксплуатации позволяет оболочке сохранять прочность и устойчивость при значительных отклонениях от проектного положения;
- преобладание зон равномерной коррозии вследствие сравнительно равномерного распределения усилий, что увеличивает долговечность оболочек в сравнении с другими металлическими конструкциями;
- универсальность конструкции, характеризуемая возможностью применения оболочечных элементов с наполнителем для широкого спектра конструкций в различных областях строительства.

Автором выполнен обзор и проведён анализ теоретических и экспериментальных исследований оболочечных конструкций с наполнителем. Условно выделены три временных периода исследований в области теории оболочек, в каждом из которых преобладает определённое направление исследований. Показано, что в настоящее время исследования в данной области направлены на решение конкретных прикладных задач, среди которых в рамках отдельного направления выделяется разработка методов моделирования взаимодействия тонких оболочек с внутренним наполнителем, предназначенных для решения прикладных задач гидротехнического строительства. Отдельно показано развитие решений, касающихся оценки напряжённо-деформированного состояния оснований оболочечных сооружений. Показана актуальность

задачи оценки напряжённо-деформированного состояния системы «гидротехническое сооружение-основание».

Выполнен анализ расчётных методик сооружений из заполненных оболочек, показан существующий опыт в части расчёта и применения железобетонных оболочек с толстыми стенками (оболочки большого диаметра – ОБД). Сформулированы проблемы эксплуатации, задачи совершенствования конструкции, технологии возведения и методов расчёта в связи с задачами применения тонких стальных оболочек.

Несмотря на преимущества, расширение спектра инженерных задач, решаемых с применением заполненных грунтом оболочек, сдерживается в связи с трудностями теоретического и расчётного характера. Известны единичные случаи применения цельнолистовых стальных заполненных грунтом оболочек при глубинах более восьми метров, появляются примеры использования их в составе оградительных сооружений. Среди основных проблем возведения и эксплуатации называются: случаи потери устойчивости и прочности; неравномерность распределения давления по подошве, прорезание основания (как следствие – запредельные значения отклонений конструкции от проектного положения, вызванные деформациями основания); несоответствие осадок расчётным величинам; превышение давления наполнителя на стенки оболочки в сравнении с вычисленным; сложности при монтаже и заполнении.

Вторая глава содержит описание области применения оболочек с наполнителем в гидротехническом строительстве (примеры на рис. 1), а также обоснование направлений расширения области применения конструкции, в том числе в смежных с гидротехникой областях строительной деятельности (блок-схема на рис. 2).

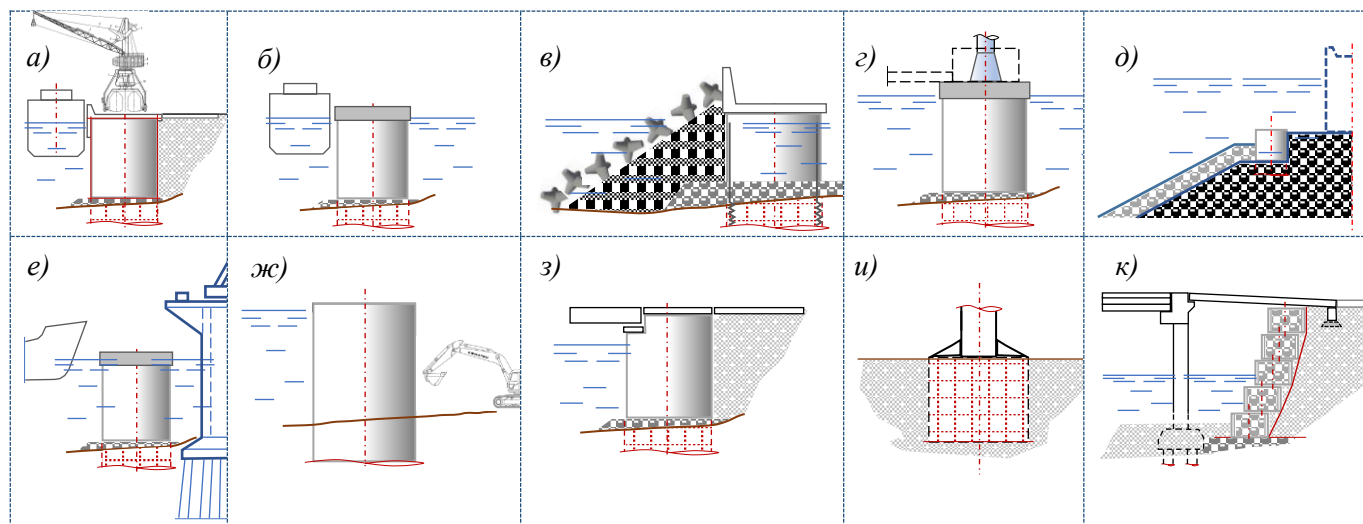


Рисунок 1 – Схемы гидротехнических сооружений, содержащих в своём составе заполненные грунтом оболочки: а – причальные набережные; элементы ограждения искусственных территорий; б – пирсы, палы; в – молы, волноломы; г – опорные блоки; д – сооружения усиления оснований; е – защитные сооружения; ж – перемычки; з – устои мостов; и – ковшовые фундаменты, всасываемые кессоны; к – набережные и устои мостов из заполненных тонкостенных блоков-оболочек

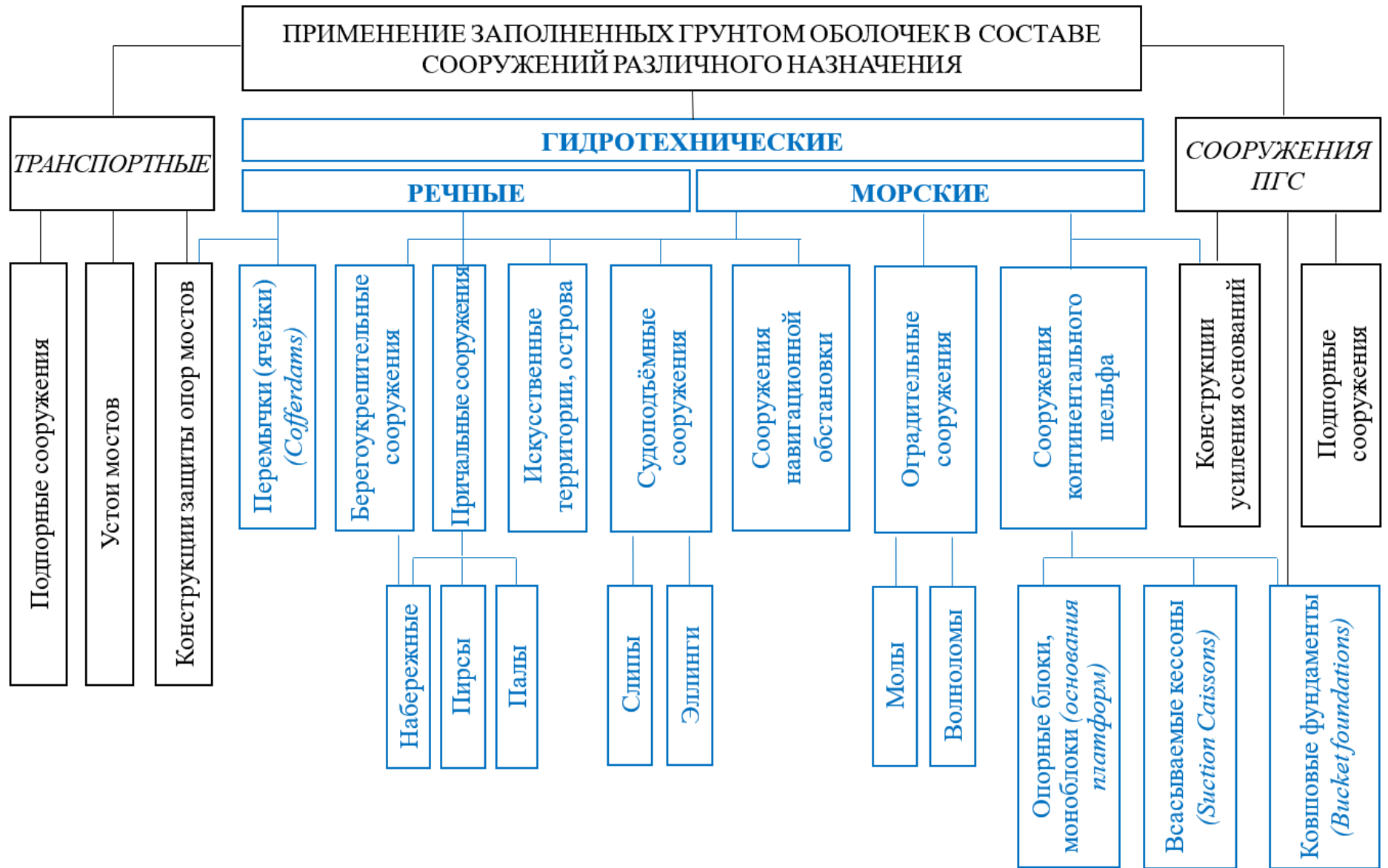
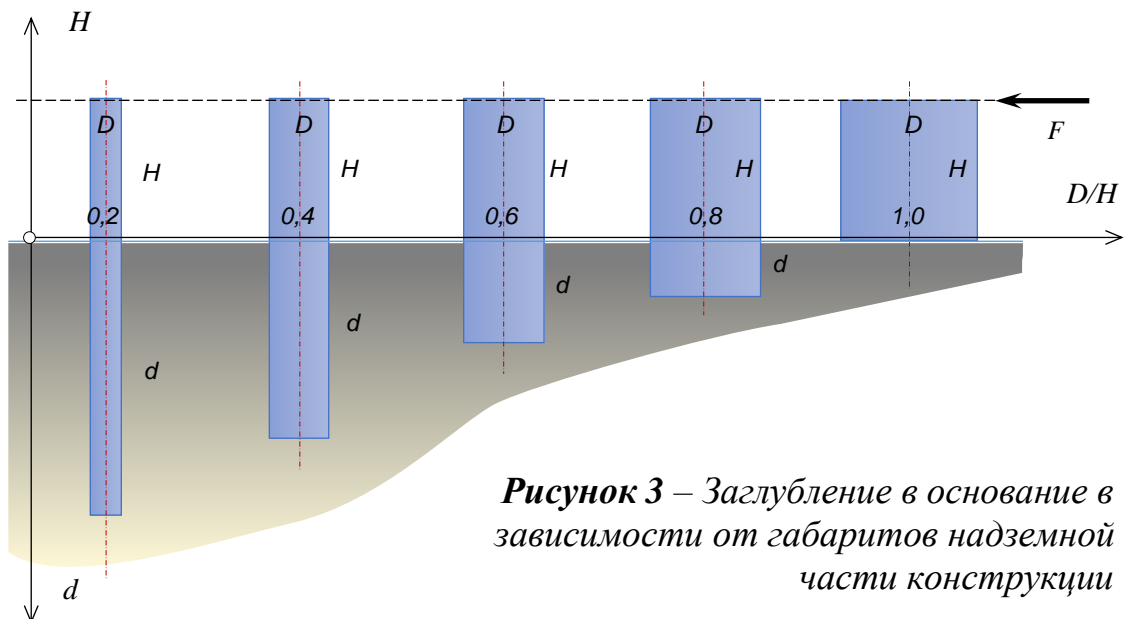


Рисунок 2 – Область применения оболочек с наполнителем в гидротехническом строительстве и смежных областях

В диссертации сформирована система типовых решений применения заполненных оболочек как основных несущих конструкций в составе гидротехнических сооружений различного назначения. Такие сооружения могут быть сгруппированы в отдельную категорию, для которой *в независимости от назначения сооружения, основа расчётной схемы несущей конструкции (базовая модель) представляется как система внецентренно-нагруженных тонких оболочек, заполненных сыпучим телом, воспринимающих типовые (характерные для конструкции) и специфические (характерные для типа сооружения и/или места строительства) нагрузки и воздействия, и закреплённых на грунтовом основании.*

В зависимости от назначения сооружения размеры и форма заполненных оболочек могут быть различны. Функция сооружения, ожидаемые нагрузки и заданные условия строительной площадки помимо материала и габаритов конструкции определяют также и характер взаимодействия сооружения с основанием. В зависимости от расчётных условий могут быть приняты различные варианты расчётных схем, отличающихся заданными габаритами оболочки и величиной её заделки в грунт основания (рис. 3). Критерий идентификации заполненной оболочки как гравитационного сооружения с учётом свойств основания определён из следующих рассуждений.



Для определения признака классификации рассмотрена общая условная расчётная схема сооружения (рис. 4, а) из заполненных грунтом (*in*) оболочек диаметром (шириной сечения) D , опирающегося на грунтовое основание (1), обеспечивающего подпор грунта (*bf*) заданной высоты H и воспринимающего комплекс нагрузок ($q, F, G \dots$). В общем случае сооружение погружено нижним торцом в грунт на глубину d , равную мощности прорезаемого слоя грунта основания (2). Схема предполагает высокую продольную жёсткость (недеформируемость) сооружения.

В качестве критерия классификации автором введен параметр k_c , отражающий долю удерживающего момента на уровне подошвы сооружения, обеспечиваемого

собственным весом сооружения: $k_c = M_{y\delta(G)} / M_{y\delta(Pp+G)}$, где $M_{y\delta(Pp+G)}$ – суммарный удерживающий момент на уровне подошвы сооружения с учётом действия силы пассивного отпора P_p .

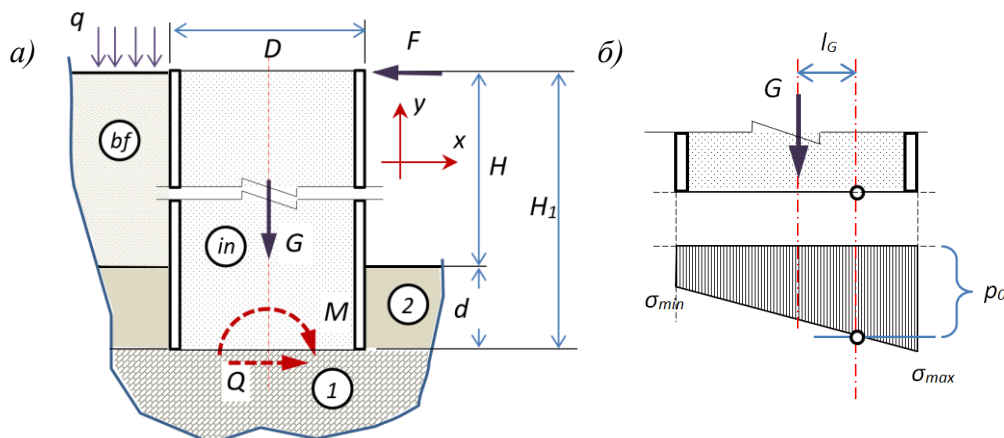


Рисунок 4 – Расчётная схема сооружения

a – вертикальное поперечное сечение; *б* – плечо приложения силы собственного веса

При этом величина удерживающего момента от собственного веса $M_{y\delta(G)}$ определяется с учётом смещения точки поворота вглубь подошвы. Плечо l_G действия силы собственного веса G сооружения ограничивается условием превышения действующих давлений по подошве сооружения σ_{max} над величиной предельного давления p_0 (рис. 4, б):

$$l_G = \frac{D}{2} - \left((\sigma_{max} - p_0) \cdot \left(\frac{D}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \right) \right); \text{ при } l_G \leq \frac{D}{2}, \quad (1)$$

В зависимости от величины k_c предварительная расчётная схема заполненной оболочки принимается как для *гравитационного (массивного)* сооружения, если вклад собственного веса в обеспечение удерживающего момента находится в пределах от 80 до 100% ($1 \geq k_c > 0,8$); в диапазоне $0,8 \geq k_c > 0,2$ оболочка может быть отнесена к *полугравитационным (полумассивным)* сооружениям, и при значении $k_c \leq 0,2$ на заполненную оболочку распространяются правила расчёта *тонких заземлённых стенок*, для которых сопротивление грунта по подошве практически не учитывается.

В качестве иллюстрации процесса отнесения конкретного сооружения к категории гравитационных, что обуславливает дальнейшую методику его расчёта, приведены зависимости классификационного параметра k_c от отношения величины заглубления к заданной высоте подпора (d/H) при различных соотношениях D/H (рис. 5).

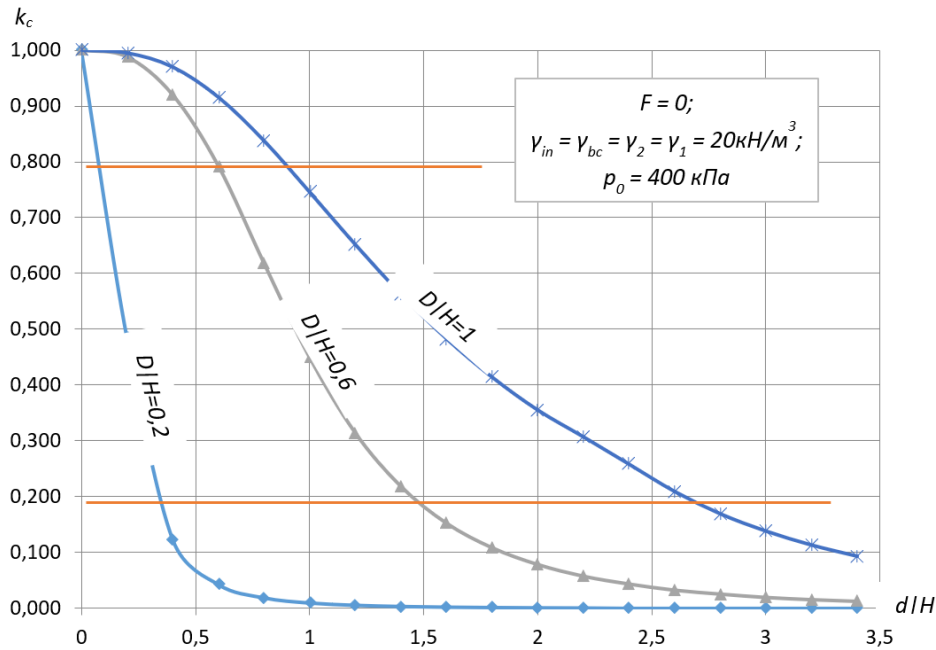


Рисунок 5 – Определение классификационного параметра k_c

Классификация с использованием предложенного критерия позволяет определиться с предварительным выбором расчётной схемы сооружения. При этом во внимание принимаются не только заданные размеры конструкции и ожидаемые нагрузки, но и физико-механические свойства грунтового основания.

Далее в результате расчётных исследований определён диапазон параметров расчётной модели, при которых рассматриваемая конструкция относится к категории заполненных оболочек. Решена задача определения диапазона эффективного соотношения основных размеров заполненной оболочки (D/H) с учётом жёсткости конструкции (приняты во внимание показатели деформационных свойств наполнителя и оболочки: соотношение модулей деформации E_{inf}/E_{shell}). За критерий эффективности параметров расчётной модели принято оптимальное распределение внутренних усилий в оболочке: радиальные усилия N_R близки по значению усилиям N_M , направленным вдоль образующей оболочки.

В результате исследований определена как область рациональных значений D/H в зависимости от изменения деформационных характеристик наполнителя из условия $N_M/N_R \approx 1$ (табл. 1), так и вообще область рассматриваемых значений D/H и E_{inn}/E_{shell} , при которой конструкция может быть отнесена к категории оболочек с наполнителем (табл. 2).

Табл. 1

E_{inf}/E_{shell}	D/H
0,000015	0,65
0,00015	0,70
0,0015	0,80
0,015	1,20

Табл. 2

E_{inf}/E_{shell}	D/H
$\leq 0,00015$	$\geq 0,3$
(0,00015, 0,0015)	$\geq 0,4$
(0,0015, 0,015)	$\geq 0,55$
$\geq 0,015$	не относится

При других соотношениях размеров и соотношениях деформационных характеристик конструкция относится либо к стержням сплошного сечения, либо к массивам (рис. 6).

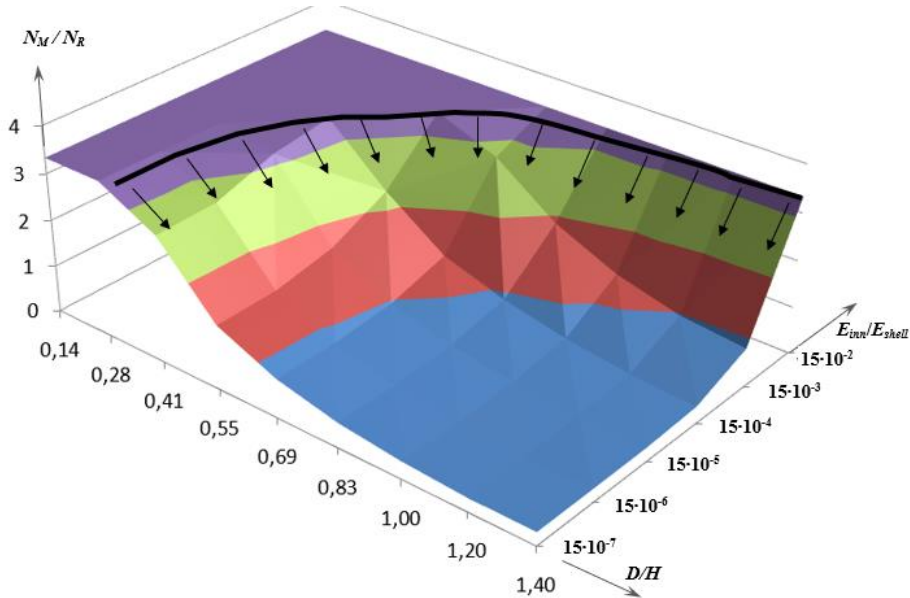


Рисунок 6 – Область значений $((N_M / N_R), (D/H), (E_{inf}/E_{shell}))$, соответствующих конструкции «оболочка с наполнителем»

В третьей главе приведено аналитико-численное решение задачи определения усилий и перемещений заполненной оболочки, построенное на основе технической теории оболочек В.З. Власова, обозначена область применения такого решения. В рассматриваемом решении внутренние перемещения оболочки: ω (радиальные), u (вертикальные) и v (тангенциальные) и усилия N, S, M, Q и T (рис. 7, а) представляют собой функцию от угловой координаты β и определяются в виде тригонометрических рядов (В.З. Власов).

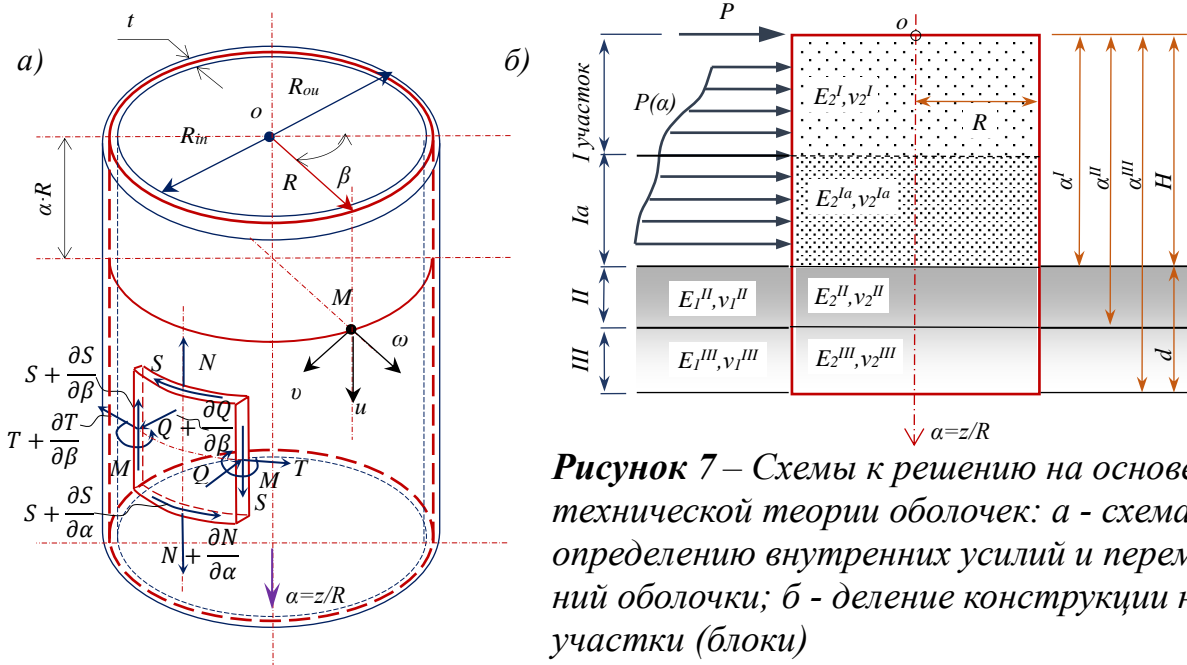


Рисунок 7 – Схемы к решению на основе технической теории оболочек: а - схема к определению внутренних усилий и перемещений оболочки; б - деление конструкции на участки (блоки)

Коэффициенты тригонометрических рядов для основных перемещений и усилий для заданной точки поверхности оболочки описываются методом начальных параметров. При этом неизвестные начальные параметры определяются из граничных условий. Например, для случая свободного верхнего торца оболочки граничные условия принимаются как $N(\alpha) = S(\alpha) = 0; \alpha = 0$; для случая жёсткого защемления

нижнего торца оболочки граничные условия примут вид: $v(\alpha) = u(\alpha) = 0$; $\alpha = H/R$. Для определения напряжённо-деформированного состояния внутреннего наполнителя применён метод перемещений, при котором за основные неизвестные принимаются перемещения v , u , w произвольной точки наполнителя M и далее нормальные и касательные напряжения вычисляются через перемещения известными формулами как для упругого основания. Такой подход приводит к составлению сложной системы уравнений, и реализован для ограниченного набора граничных условий (решается для плотного прилегания грунта к поверхности оболочки, с отбрасыванием части усилий) – Николау В.И. и др., Иванов В.А., Селивёрстов В.И. и др. Решение справедливо для участка заполненной оболочки, имеющего по высоте α неизменные свойства и постоянную нагрузку. В реальности условия работы оболочек значительно сложнее и для возможности использования полученного решения конструкцию оболочки следует разделить на блоки (рис. 7, б), в пределах каждого из которых решение останется справедливым.

Для учёта сжимаемости грунта основания, возможности описания условий контакта грунта внутреннего наполнителя с оболочкой и расширения перечня возможных граничных условий автором разработана базовая численная модель системы «оболочка-наполнитель-основание». Описана последовательность построения базовой модели сооружения с последующей её калибровкой по данным экспериментальных исследований и валидацией сопоставлением с доступными по трудоёмкости вычислений аналитическими решениями. Оболочка моделируется элементами типа «плита», поведение материала в них основано на решениях теории механики трёхмерных сплошных сред и описывается известными зависимостями между напряжениями и деформациями (1 на рис. 8). Основным элементом системы является грунт, который выполняет здесь функцию как Внутреннего наполнителя (2), так и Основания (4) – рис. 8.

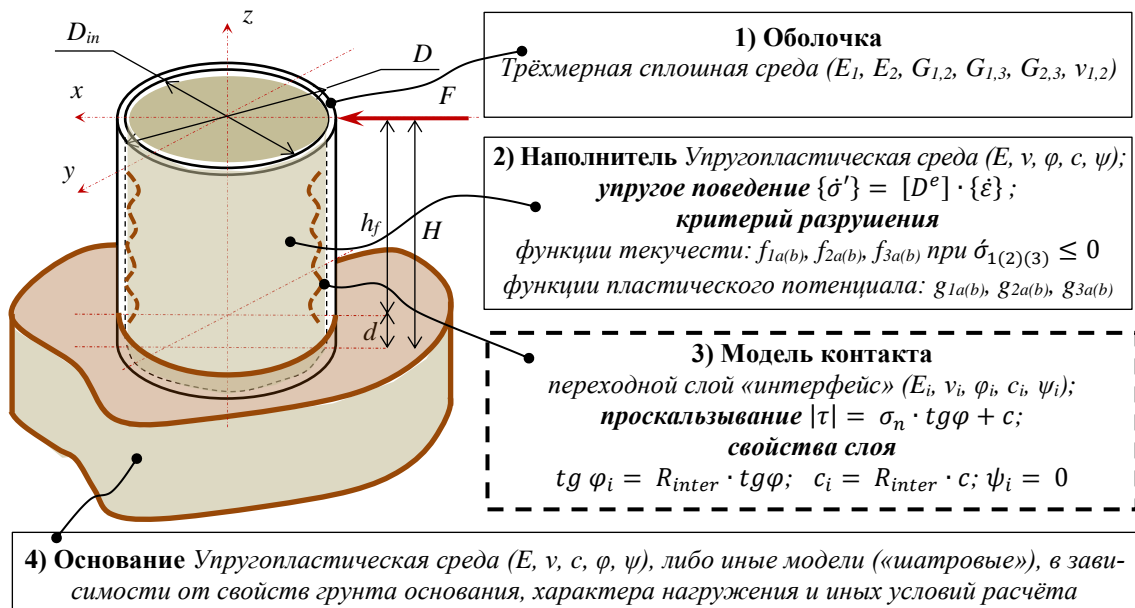


Рисунок 8 – Схема описания механического поведения сред модели «оболочка-наполнитель-основание»

Наполнитель рассматривается как упругопластическое тело. Критерий текучести Кулона-Мора сформулирован в виде функций главных напряжений (функций текучести f). Задаются ограничения области растяжения ($\sigma' \leq 0$). Для наполнителя, который устраивается специально, такой модели, как показывают дальнейшие исследования, достаточно. Для модели основания могут быть применены другие описания поведения грунта («шатровые» модели), которые весьма полно систематизированы в конце 1970-х годов (например, в трудах Зарецкого Ю.К.) и сейчас нашли своё место в специализированных компьютерных программах.

Условия контакта (3 на рис. 8) наполнителя и оболочки описываются введением переходного (контактного) слоя между грунтом наполнителя и оболочкой. Вариант реализации такого слоя при нулевой толщине – «интерфейс» (Brinkgreve, 2013), который для большинства моделей характеризуется коэффициентом снижения прочности (R_{inters} , рис. 8). Параметры контактного слоя (интерфейса) не могут быть определены без проведения физического эксперимента, при этом его свойства будут в значительной степени зависеть от характера взаимной работы элементов. Далее поставлена задача калибровки базовой модели: для определения параметров взаимодействия сред на контакте оболочки и наполнителя далее проведена серия экспериментов на физических моделях сооружения.

В четвёртой главе предложен и реализован способ экспериментальной калибровки базовой численной модели оболочечной конструкции с наполнителем. Методика калибровки расчётной модели заключается в последовательном сопоставлении расчётных и экспериментальных перемещений контрольных точек нагружаемой системы при условии обеспечения идентичности набора параметров расчётной и экспериментальной моделей.

Приведено описание физического моделирования системы «оболочка-наполнитель-основание», воспринимающей статические и динамические нагрузки. Вычислены константы подобия в отношении компонентов системы: оболочки, наполнителя, окружающего грунта, статических нагрузок ($\alpha_\gamma, \alpha_\varphi, \alpha_c, \alpha_l, \alpha_p$) и волновых процессов ($c_\gamma, c_\varphi, c_c, c_l, c_\sigma, c_v, c_u, c_t, c_f, c_\sigma$). Разработаны и реализованы проекты экспериментальных установок (рис. 9), позволяющих имитировать статические (передаваемые непосредственно на сооружение) и динамические (через грунтовое основание) нагрузки.

Проведены серии испытаний конструкции тонкостенной оболочки с наполнителем на податливом основании для моделей масштаба 1:20 ($\alpha_l = 0,05, c_l = 20$). Сопоставление экспериментально полученных перемещений (кривая «Э» на рис. 10 – средние значения) с расчётными значениями (кривые «0,2», «0,3» и «0,4» для соответствующего коэффициента снижения прочности) позволило установить приемлемый диапазон значений искомого параметра математической модели, описывающего условия контакта наполнителя и оболочки (коэффициент снижения прочности): диапазон значений составляет (0,3; 0,4).

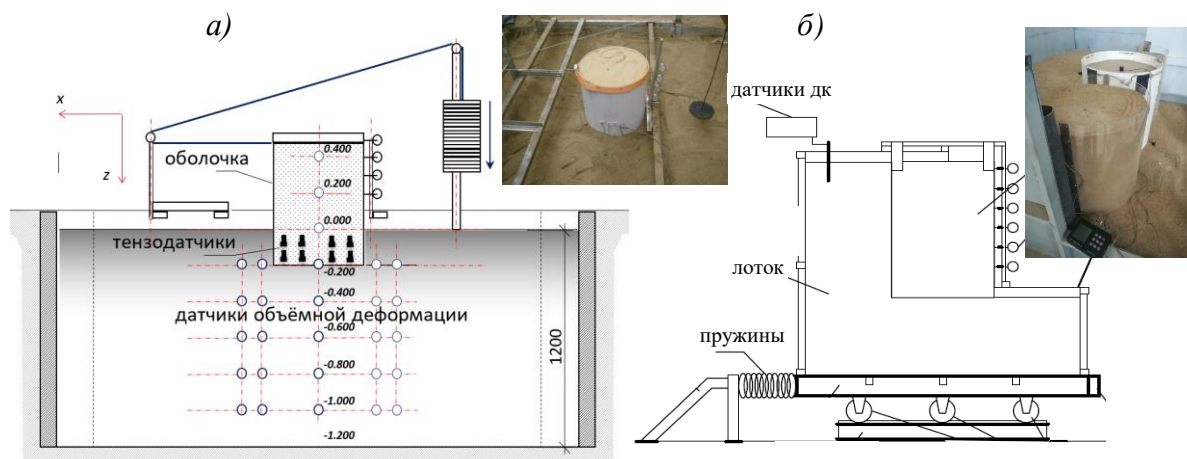


Рисунок 9 – Экспериментальные установки: статическое (а) и динамическое (б) нагружение

При использовании в расчёте коэффициента $<0,3$ расчётные перемещения резко возрастают, а при его значениях $>0,4$ контактный слой в численной модели становится более упругим, и система приобретает завышенные запасы устойчивости, что не соответствует действительной работе сооружения, наблюдаемой при эксперименте.

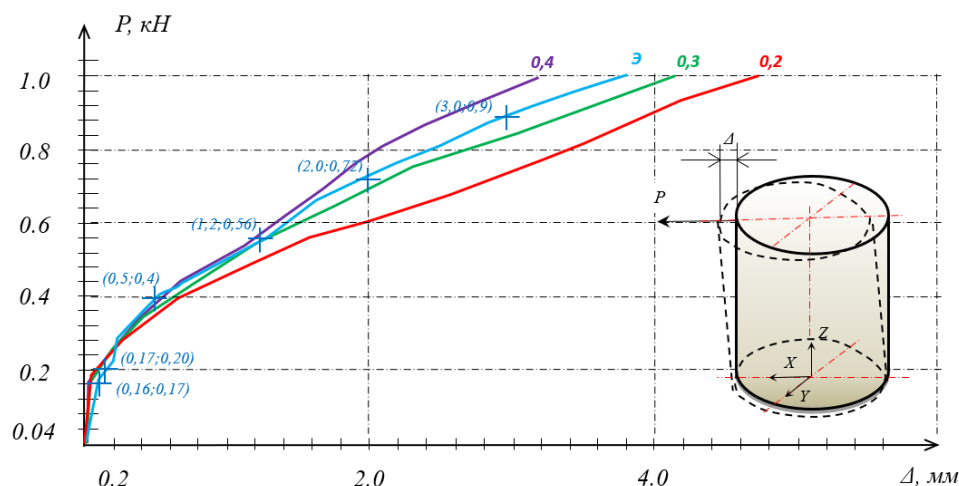


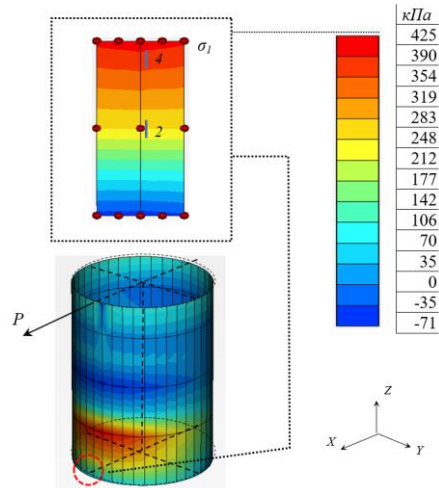
Рисунок 10 – График зависимости перемещений от нагрузки

В работе выполнена валидация базовой модели по различным параметрам. Проведено сравнение значений напряжений, полученных расчётом по предложенной модели, с данными эксперимента. Оценивались радиальные напряжения в оболочке и напряжения сжатия по образующей, возникающие в зоне контакта тонкой оболочки с основанием (рис. 11). Предложенная модель даёт результаты, хорошо соотносящиеся с данными эксперимента (отклонение значений напряжений в опорной зоне оболочки в разных точках составляет $5 \div 10 \%$).

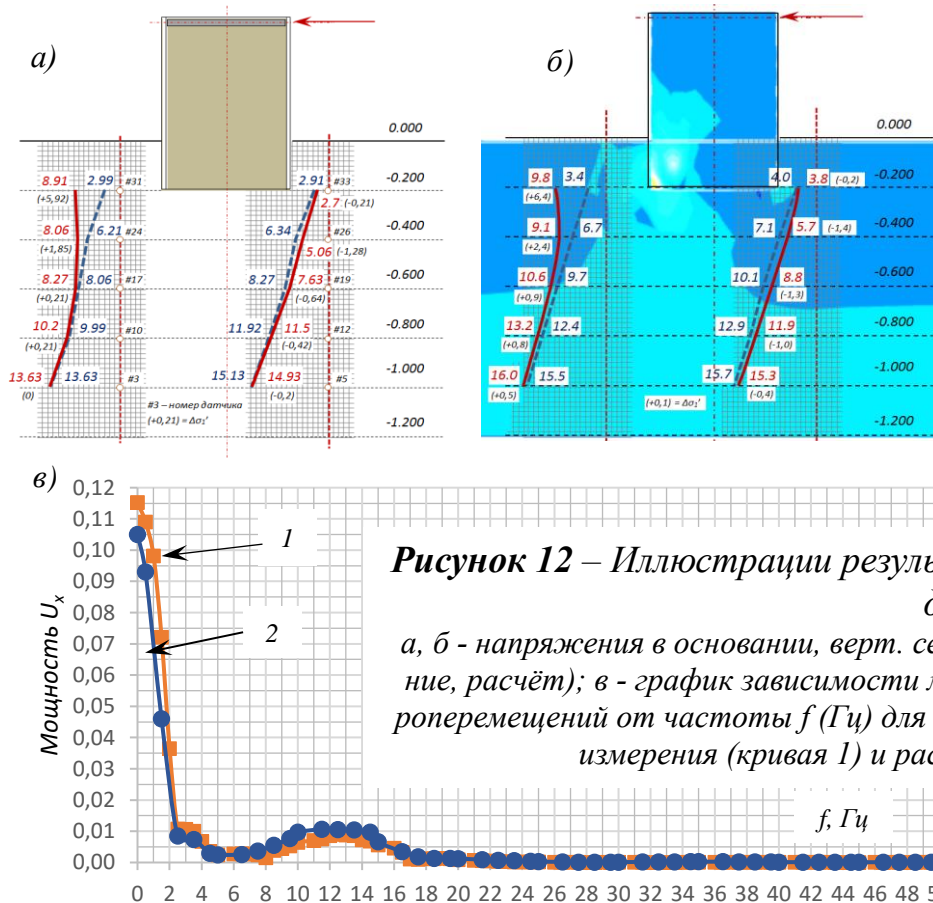
В результате экспериментальных исследований определена также картина распределения и величина напряжений в толще основания под оболочкой для проверки результатов вычислений по предложенной численной модели (рис. 12 а, б). Для этого датчики объёмной деформации тарированы и расположены в основании модели (рис. 9, а).

Направление действия усилия	№ датчика	Напряжения σ_1 , кН/м ²		Погр.
		Эксп.	Расчёт	
Радиальные напряжения	1	-699,69	-665,34	4,9%
	3	-200,63	-181,75	9,4%
Напряжения по образующей	2	242,06	252,99	4,3%
	4	372,19	389,51	4,4%

Рисунок 11 – Напряжения по образующей (ось Z) в опорной части оболочки: цветовая индикация приведена для фрагмента схемы



Сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных измерений показало, что тенденции и величины распределения напряжений согласуются. Средняя величина расхождений между вычисленными и экспериментально измеренными эффективными нормальными напряжениями грунта составила около 12,8% с преобладанием вычисленных значений над экспериментальными.



Проведены экспериментальные исследования модели сооружения для условий динамического нагружения. Величина расхождения расчётных и экспериментальных значений мощностей перемещений контрольных точек системы составляет до 15 %

(рис. 12, в). Результаты экспериментальной проверки расчётной модели конструкции позволяют говорить о приемлемости применения разработанной и экспериментально калиброванной расчётной модели сооружения. С целью проверки работоспособности предложенной базовой модели, уточнённой в результате экспериментальных исследований, далее поставлена задача разработки теоретической модели, основанной на аналитическом решении и описывающей взаимодействия конструкции с грунтовым основанием.

В пятой главе разработана теоретическая модель, функционально связывающая параметры грунта основания и размеры сооружения с предельной нагрузкой, которую сооружение воспринимает без потери несущей способности основания. Модель разработана на основе решения задачи о предельном напряжённом состоянии грунтового основания с учётом особенностей взаимодействия конструкции с основанием. Рассмотрены общие положения классической теории предельного равновесия дисперсной среды. Применена необходимая для дальнейших рассуждений задача, состоящая в том, чтобы определить, при какой пригрузке q для заданной на части поверхности основания вертикальной нагрузки p грунтовое основание сооружения переходит в предельное напряжённое состояние (рис. 13, а).

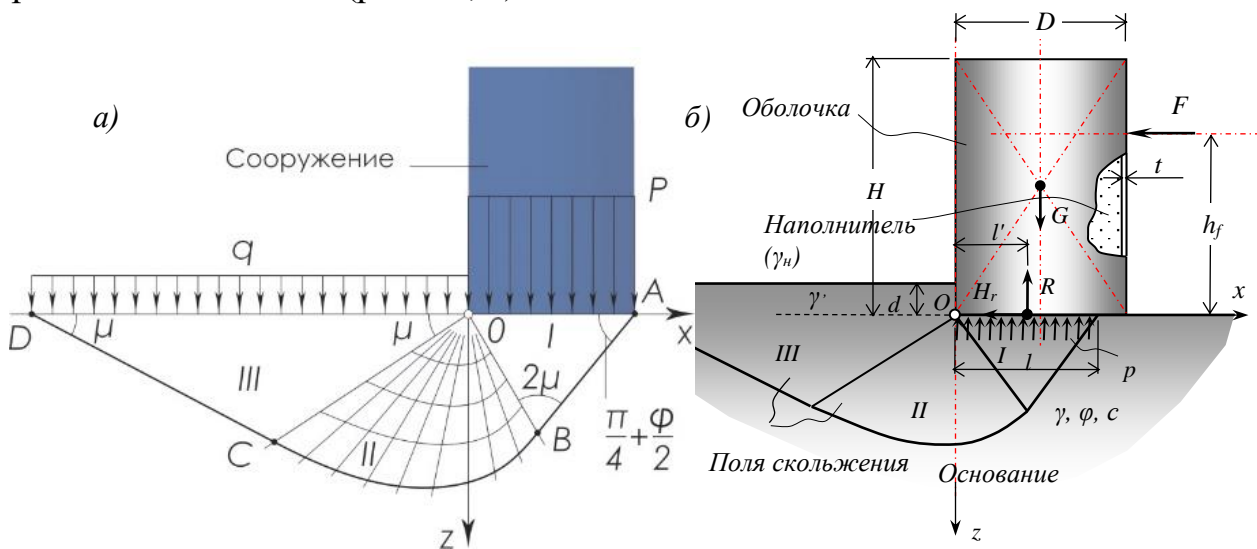


Рисунок 13 – К построению теоретической модели: а – схема равновесия системы, б – схема к расчёту устойчивости сооружения

Как отмечается в различных источниках (Христианович С.А. и др.), схема напоминает рычажные весы. Помимо действующих нагрузок, равновесие обеспечивается также силами внутреннего сопротивления грунта, характеризуемыми углом внутреннего трения ϕ и давлением связности σ_c при известном удельном сцеплении c .

В предельном состоянии рассматривается работа грунтового основания сооружения в пластической стадии. При этом предельное давление распределяется только в пределах участка (пятна) контакта, определяющего в свою очередь очертание призмы выпора. Принимая во внимание, что у рассматриваемой конструкции нет сплошной подошвы, критические с точки зрения расчёта напряжения в основании для

данной задачи возникают непосредственно под оболочкой в локальной области нижней наружной грани сооружения. Таким образом разрушение грунта происходит прежде всего вблизи точки поворота, поэтому для определения предельной нагрузки p , вызывающей переход грунта в предельное состояние, рассмотрены граничные условия на бесконечно малых участках вправо и влево от центра равновесия – точки O ($p = p_0$).

Согласно решению Соколовского В.В., условия для определения предельного давления на отрицательной полуоси $p=p_0$ (при $z = 0$ и $x < 0$), при котором соблюдается состояние предельного равновесия, формулируются в виде:

$$ctg\varphi \ln \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \frac{p_0 + \sigma_c}{q_0 + \sigma_c} = \pi, \quad p_0 + \sigma_c = (q_0 + \sigma_c) \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi}, \quad (2)$$

таким образом, при отсутствии пригрузки ($q_0=0$), когда система уравновешена силами трения и сцепления в грунте, предельное давление:

$$p_0 = c \cdot ctg\varphi \cdot \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi} - 1 \right). \quad (3)$$

Рассмотрен ряд оболочек (n штук), опирающихся на сжимаемое основание и воспринимающих помимо собственного веса G горизонтальную нагрузку F , которая может служить моделью действия бокового давления грунта на сооружение, льда, волны, навала судна, усилия швартовки, различных видов технологической нагрузки и других воздействий (рис. 13, б).

Оценка устойчивости проводится по методике единого коэффициента запаса: $M_1 \geq k \cdot M_2$, где M_2 – опрокидывающий момент, определяемый действием горизонтальной равнодействующей нагрузки F и плечом h_f , k – коэффициент запаса, назначаемый в зависимости от класса сооружения, M_1 – удерживающий (восстанавливающий) момент, возникающий в результате действия сил собственного веса сооружения. Получена зависимость для определения максимальной (предельной) опрокидывающей силы F_{max} :

$$F_{max} = -n \cdot \frac{\gamma_H H \pi D^3}{8 \cdot h_f \cdot k} \left(\frac{\gamma_H H}{c \cdot ctg\varphi \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi} - 1 \right)} - 1 \right). \quad (5)$$

При этом учесть влияние заглубления оболочки d в основание с удельным весом γ' можно, введя вес прорезаемого слоя, не обнуляя пригрузку на поверхности $q_0 = \gamma' \cdot d$:

$$F_{max} = -n \cdot \frac{\gamma_H H \pi D^3}{8 \cdot h_f \cdot k} \left(\frac{\gamma_H H}{(\gamma' \cdot d + c \cdot ctg\varphi) \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi} \right) - c \cdot ctg\varphi} - 1 \right). \quad (6)$$

При необходимости учёта сложных сочетаний нагрузок зависимость удобно представить в виде, позволяющем оценить предельный момент на уровне подошвы оболочки от всех внешних нагрузок, воспринимаемых сооружением выше уровня подошвы:

$$M = -n \cdot \frac{\gamma_H H \pi D^3}{8 \cdot k} \left(\frac{\gamma_H H}{c \cdot ctg\varphi \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot e^{\pi \cdot tg\varphi} - 1 \right)} - 1 \right). \quad (7)$$

Формулы (5÷7) представляют собой теоретическую модель, функционально связывающую физические и физико-механические параметры грунта основания, наполнителя и размеры сооружения с максимальными усилиями, воспринимаемыми сооружением без нарушения равновесия системы.

Результаты расчёта допустимой нагрузки на сооружение по предложенным формулам согласуются с результатами численного моделирования (расхождение значений предельной нагрузки – до 10%). В результате сопоставления результатов численного и аналитического решения (при возможных для аналитического решения расчётных условиях) подтверждена возможность применения базовой численной модели для оценки напряжённо-деформированного состояния сооружений, содержащих в своём составе тонкие заполненные грунтом оболочки. Приведённый алгоритм действий к формированию аналитического решения в общем универсален, и может быть применён для оценки устойчивости на основании гидротехнических сооружений из оболочек различной формы и компоновки. При этом для определения предельного давления p могут быть обоснованы и применены иные решения, более точно соответствующие конкретным условиям расчёта.

Теоретическая модель, описанная приведёнными формулами, позволяет выполнить предварительный подбор габаритов сооружения при заданных характеристиках основания на ранних стадиях проектирования, и далее перейти к более трудоёмкой стадии вычислений с использованием предложенной численной модели для дальнейших расчётов перемещений сооружения, деформаций основания и напряжений в теле оболочки, наполнителя и грунте основания. Для ускорения и автоматизации расчётов приведённые рассуждения реализованы автором в виде программы для персонального компьютера (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618170 от 21.07.2020).

В **шестой главе** приведена последовательность расчёта сооружений из заполненных грунтом оболочек, установленных на грунтовом основании. Приведена методика формирования расчётной статической модели (РСМ) и расчётной динамической модели (РДМ).

Основные этапы расчётного обоснования сооружений из заполненных оболочек, сформированные на основе проведённых автором исследований и учитывающие специфику конструкции, сведены в логическую последовательность с сохранением требований и условий, налагаемых действующими нормами на проектируемую систему. При этом процесс расчётного моделирования разделён на три укрупнённых блока (рис. 14). *Блок 1 – Основные параметры расчётной модели; Блок 2 – Нагрузки и воздействия; Блок 3 – Расчётное обоснование.*

В общей последовательности в Блоке 1 расположен Раздел 1Б (*Проверка и редактирование параметров системы*), который предполагает увязку на ранних стадиях проектирования исходных параметров системы (основные размеры сооружения, ожидаемые нагрузки) с заданными грунтовыми условиями на основе предложенной теоретической модели оценки устойчивости сооружения (*с применением программы ЭВМ № 2020618170*).

В общей последовательности в Блоке 2 расположен Раздел 2Б (*Дополнительные модули*), который предполагает учёт конструктивных особенностей сооружения, содержащего в своём составе систему заполненных грунтом оболочек, при вычислении нагрузок в зависимости от назначения и условий эксплуатации сооружения (давление грунта внутри и снаружи оболочки; действие воды на сооружение; данные к построению расчётной динамической модели; иные специфические нагрузки (циклическое действие льда и др.)).

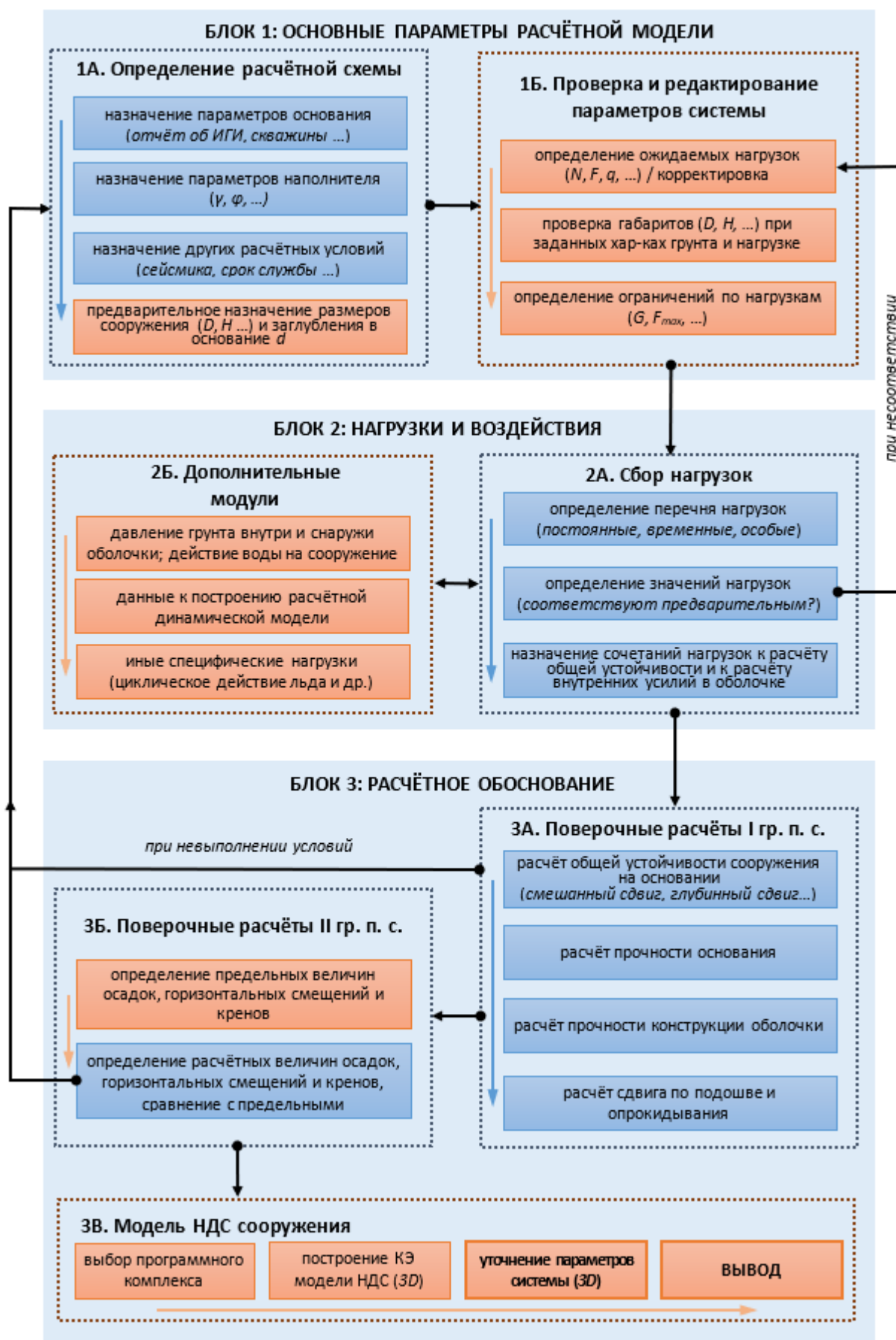


Рисунок 14 – Блок-схема расчётного моделирования

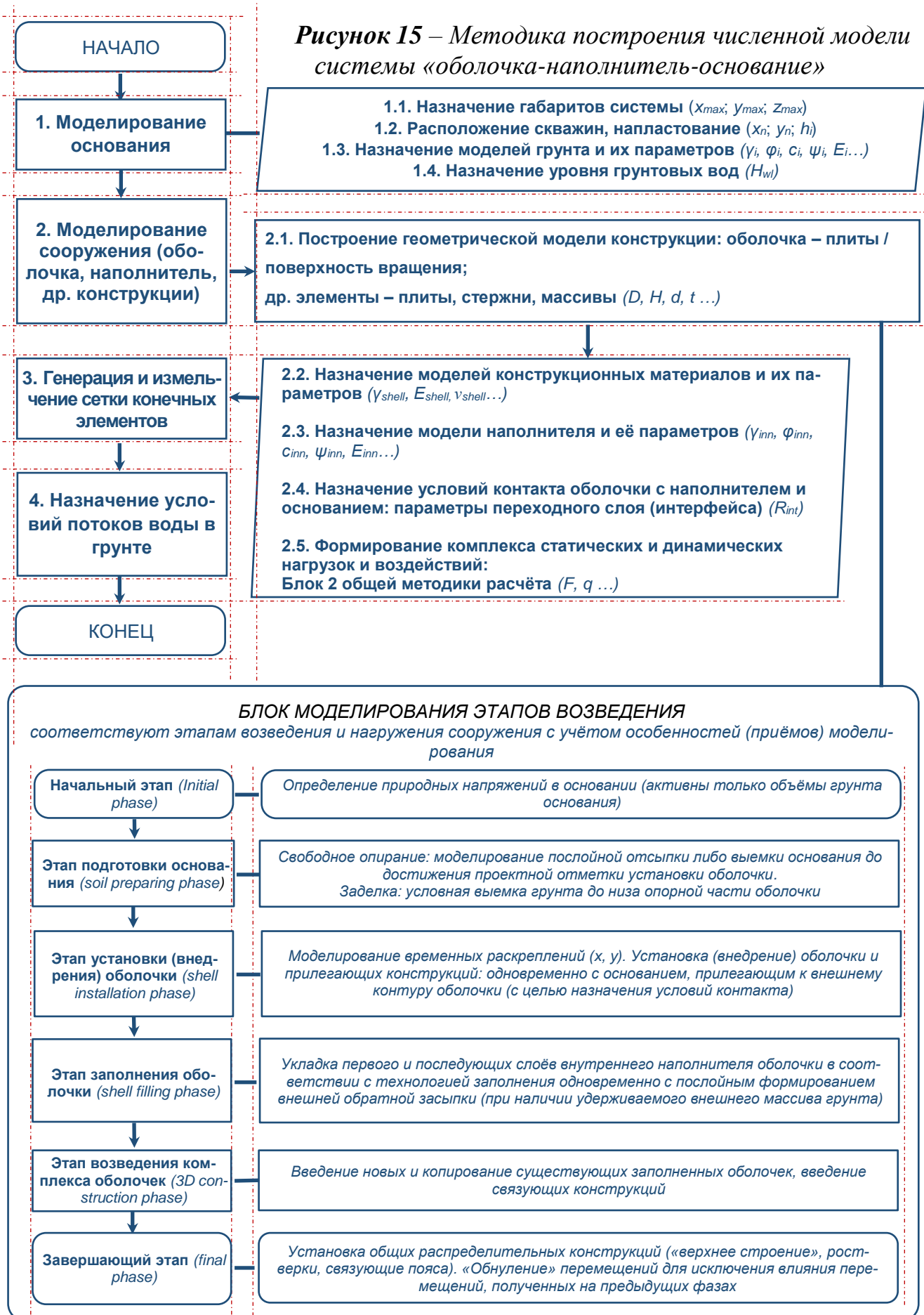
В Блоке 3 предполагается помимо общих требований к определению предельных перемещений в соответствии с функциональным назначением сооружения, а также требований технологического процесса его эксплуатации, учитывать *предельно-допустимые перемещения грунта основания* с последующим выделением наименьших (критических) значений. Для определения предельных перемещений грунта основания на начальных стадиях проектирования используются данные штамп-овых испытаний, при этом в качестве критерия определения предельного перемещения штампа принимается момент начала развития фазы пластических деформаций в грунте.

В общую последовательность в Блок 3 включён Раздел 3В (*Модель напряжённо-деформированного состояния сооружения*), который содержит методику построения конечно-элементной трёхмерной модели сооружения (блок-схема на рис. 15) с последующим уточнением параметров системы и окончательным выводом об эксплуатационных качествах сооружения. Предусмотренные предложенным алгоритмом расчётного моделирования итерации (циклы проектирования, рис. 14) возникают на этапах сбора нагрузок (сравнение уточнённых значений с ожидаемыми: 2А → 1Б) и поверочных расчётов (проверка выполнения расчётных условий: 3А → 1А; 3Б → 1А). Введение блоков 1Б и 3В позволяет избежать значительного количества «возвратов» с поздних стадий проектирования к этапу корректировки исходных данных, и повышает обоснованность выводов об обеспечении эксплуатационных качеств сооружения.

Приведены методики и рассмотрены особенности расчёта основных нагрузок на оболочечные сооружения с внутренним наполнителем. Методики адаптированы применительно к заполненным грунтом оболочкам, и используются при отсутствии соответствующего программного инструмента при формировании численных моделей, либо как альтернатива для их проверки. Приведена методика учёта циклического приложения нагрузки от примёрзшего льда при определении деформаций и напряжений в элементах рассматриваемой системы «заполненная оболочка – сжимаемое основание». Методика последовательного моделирования одного и более циклов ледового нагружения позволяет определить перемещения сооружения и напряжения в теле оболочки и в грунте основания в период эксплуатации. На рис. 16 приведён пример зависимости перемещений верха конструкции от прикладываемой знакопеременной нагрузки. Рассматриваемая расчётная ситуация возможна для морей с низкой динамикой ледяного покрова, при колебаниях уровня воды (приливы/отливы и др.).

Сформирована методика формирования РДМ сооружений из заполненных оболочек (рис. 17); включающая способ учёта демпфирующих свойств грунтовых элементов системы, основанный на решениях для двух угловых частот (Йошида, 2015). Путём назначения расчётного частотного диапазона (технические частоты f_1, f_2) при заданном коэффициенте демпфирования ξ инерционный α и гистерезисный β коэффициенты пропорциональности к матрицам массы и жёсткости могут быть определены следующим образом: $\alpha = 4\pi f_1 f_2 \frac{\xi(f_2 - f_1)}{(f_2^2 - f_1^2)}$; $\beta = \frac{\xi(f_2 - f_1)}{\pi(f_2^2 - f_1^2)}$.

Рисунок 15 – Методика построения численной модели системы «оболочка-наполнитель-основание»



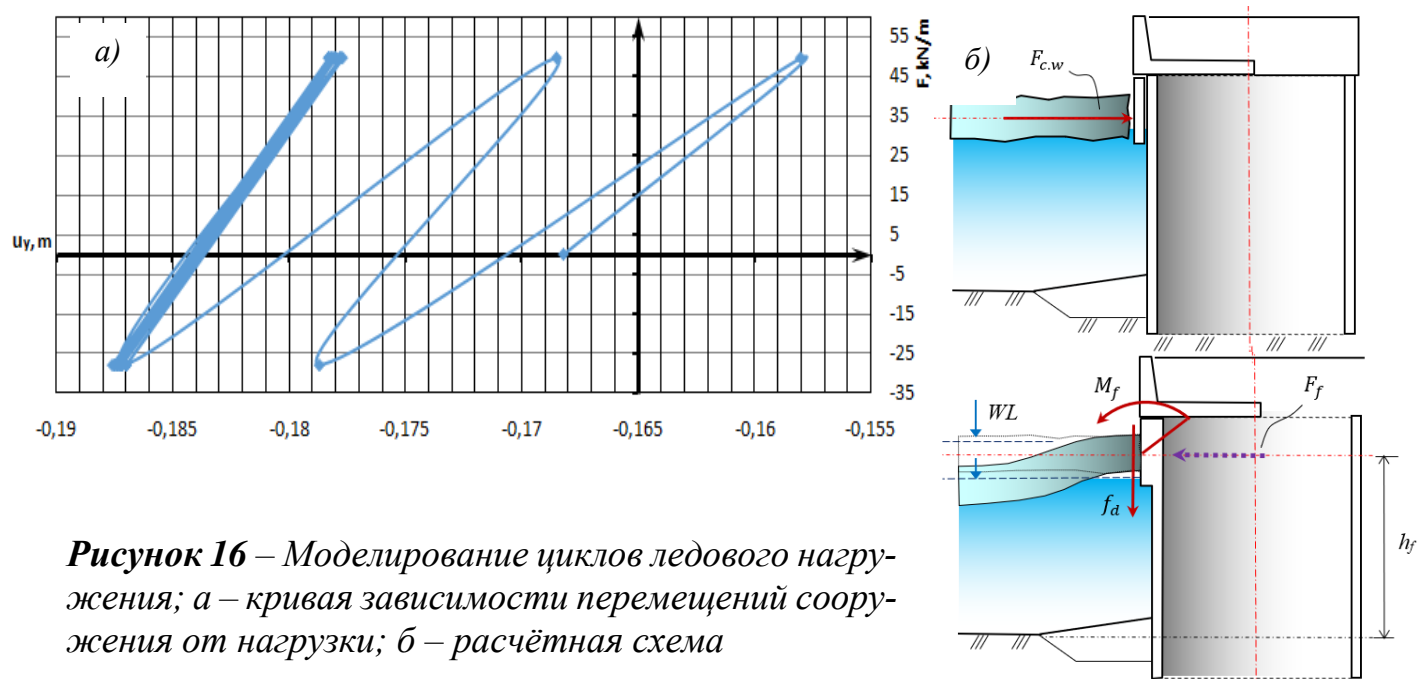


Рисунок 16 – Моделирование циклов ледового нагружения; а – кривая зависимости перемещений сооружения от нагрузки; б – расчётная схема

Приведены примеры расчётного моделирования сооружений реального размера. Автором выполнено расчётное исследование модели на примере сооружения из ряда заполненных грунтом оболочек: оценивается приемлемость принятых параметров расчётных моделей для заданной сейсмичности площадки в зависимости от допустимых величин перемещений и напряжений в элементах, с оценкой возможности развития областей «разжижения» грунта. Методика построения РДМ опробована, в частности, при расчёте конструкций причального фронта для условий высокой сейсмической активности (до 10 баллов по шкале MSK-64).

В **седьмой главе** приведено описание прикладных исследований, направленных на обоснование решений по конструированию и технологии возведения сооружений из заполненных оболочек. На основе проведённых в работе исследований в части особенностей взаимодействия компонентов конструкции заполненной оболочки между собой и с грунтовым основанием, предложены новые технические решения конструкции заполненной оболочки, а также технологические приёмы монтажа конструкции и организации взаимодействия с основанием.

Автором разработано конструктивное решение фундаментной части тонкой оболочки с введением опорной консоли, представляющей собой полку, опирающуюся на грунт основания нижней гранью (рис. 18, пат. № 2463408, пат. № 184231). Достижимый при этом технический результат выражается в распределении давления, передаваемого оболочкой на грунт основания, а также за счет включения в работу дополнительного объема грунта, расположенного «над» одной или несколькими (распределёнными по высоте) опорными поверхностями (для кругового цилиндра – кольцами).

Задача определения оптимальной ширины опорной консоли решена на основе исследования зависимости величины и распределения напряжений в основании заполненной оболочечной конструкции, испытывающей внецентренное нагружение с использованием предложенной базовой расчётной модели.

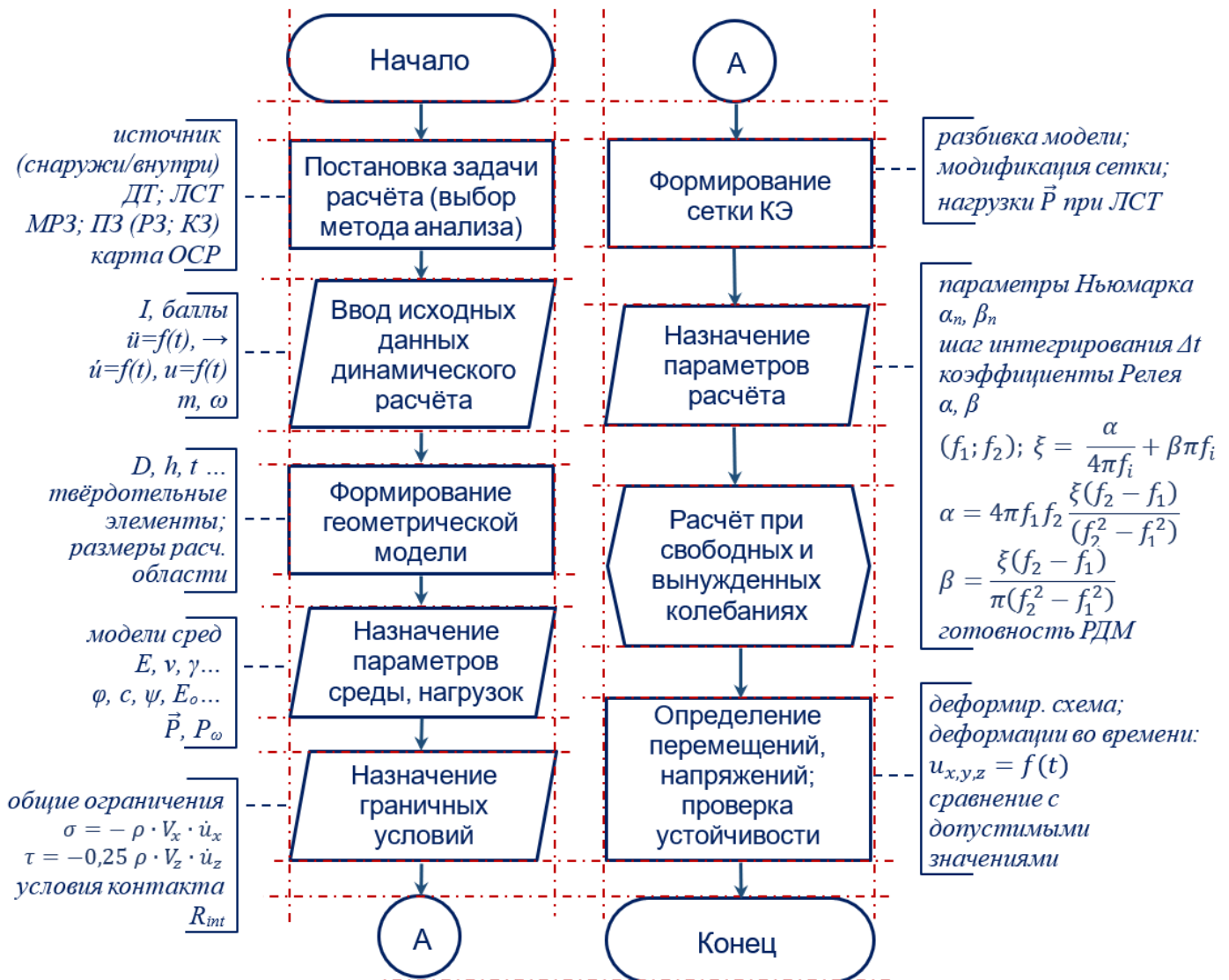


Рисунок 17 – Блок-схема динамического расчёта

Автором построена зависимость величины максимальных напряжений в грунте основания (точка А на рис. 19, а) от относительного вылета консоли (отношение ширины опорной поверхности к диаметру оболочки B/D).

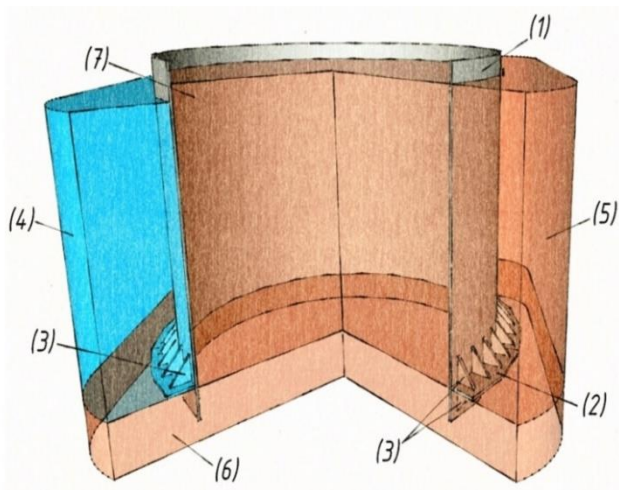


Рисунок 18 – Конструкция оболочки с опорной консолью: 1 – оболочка, 2 – опорная консоль, 3 – рёбра жёсткости, 4 – акватория, 5 – грунт обратной засыпки, 6 – грунт основания, 7 – грунт наполнителя

Напряжения снижаются в диапазоне изменения отношения B/D от 0,02 до 0,06 (снижение в $1,6 \div 1,80$ раза по сравнению с вариантом без опорной консоли – рис. 19, б). При бóльших значениях вылета гибкость опорного элемента растёт, и он теряет способность воспринимать реактивное давление грунта основания: значения напряжений постепенно возвращаются к начальным значениям, когда основная часть нагрузки воспринимается нижним торцом оболочки. Аналогичные зависимости построены для перемещений оголовка оболочки.

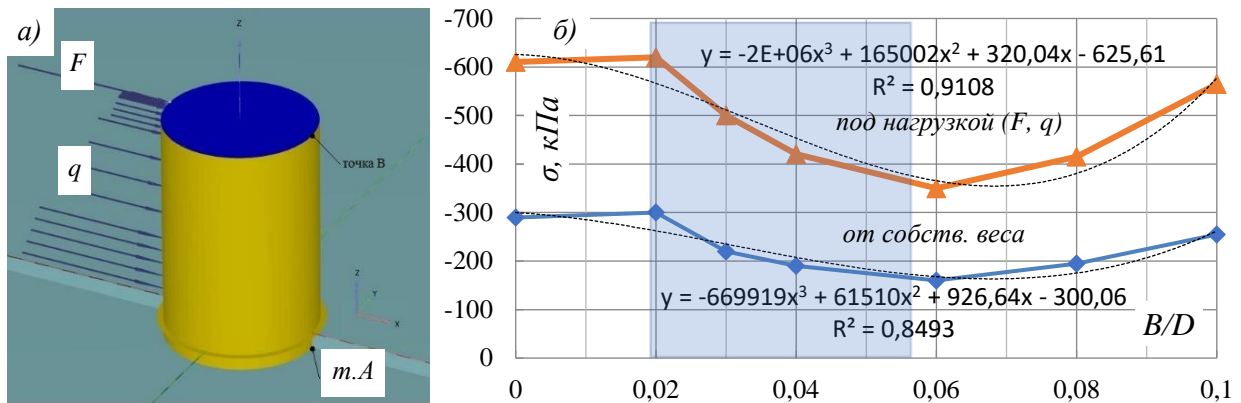


Рисунок 19 – Определение вылета опорной консоли: а – схема расчётной модели заполненной оболочки; б – напряжения в основании в зависимости от вылета опорной консоли

В работе проведены экспериментальные исследования взаимодействия опорной части заполненной оболочки с основанием на малых моделях с различными вариантами опорных частей (рис. 20): без опорной консоли, с опорной консолью, в виде жёсткого штампа. Для эксперимента сохранены условия моделирования, рассмотренные ранее.

Результаты исследований показали, что модель жёсткого круглого штампа, традиционно используемая для описания взаимодействия сооружений из оболочек с грунтом основания, даёт принципиально отличные результаты в сравнении с моделью с открытым нижним торцом.

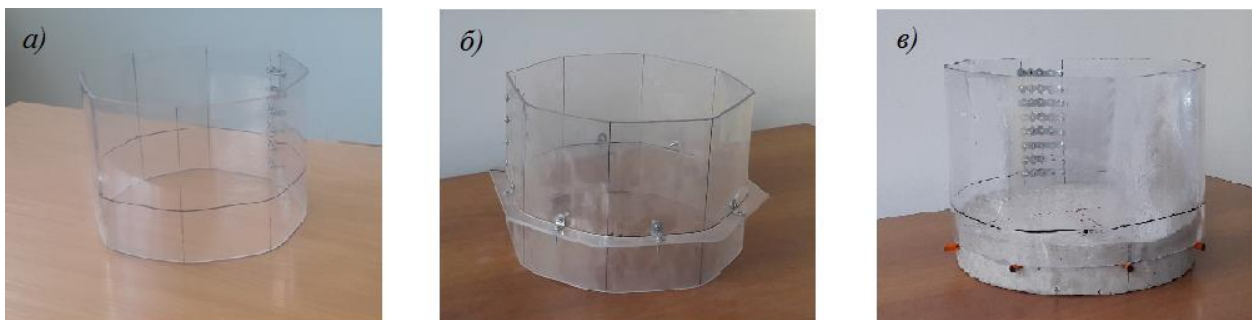


Рисунок 20 – Модель опорной части оболочки: а – без опорной консоли; б – с опорной консолью; в – жёсткий штамп

По данным экспериментов (рис. 21) для оболочки с открытым торцом характерно постепенное нарастание темпа роста осадок в сравнении с темпом роста нагрузки вплоть до обрушения.

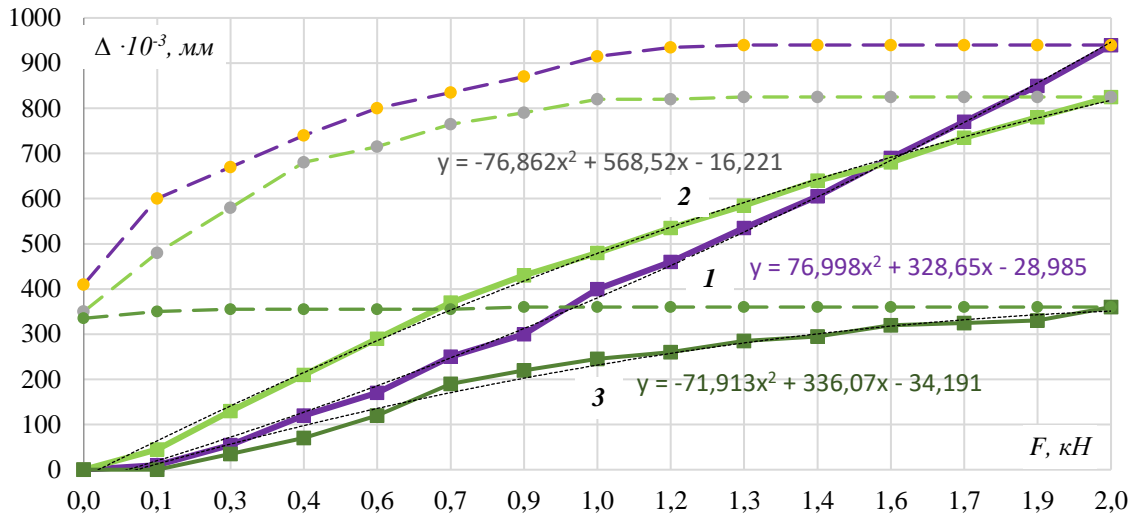


Рисунок 21 – Зависимости осадок моделей от нагрузки: 1 – без опорной консоли; 2 – с опорной консолью, 3 – жёсткий штамп

При этом для жёсткого штампа в том же диапазоне нагрузок темп роста осадок – снижается. Модель жёсткого штампа в данном случае не отражает картины взаимодействия заполненной оболочки с основанием: для анализа взаимодействия опорной части заполненной оболочки с основанием требуется использование моделей, учитывающих отсутствие сплошной опорной поверхности оболочки. При этом приблизиться к модели штампа по характеру взаимодействия опорной части сооружения с основанием позволяет введение опорной консоли: такой конструктивный приём позволяет снизить как темп нарастания осадок по мере нагружения, так и величину перемещений на 10÷15 % в сравнении с базовой моделью с открытым нижним торцом.

Выполнено обоснование технологической последовательности возведения протяжённого сооружения из заполненных грунтом оболочек из условия соблюдения равномерности распределения напряжений в основании и минимизации деформаций конструкции при монтаже. Для фрагмента (условной секции) из трёх оболочек (рис. 22, а) определены варианты возведения, в большей или меньшей степени приводящие к накоплению деформаций по мере возведения сооружения.

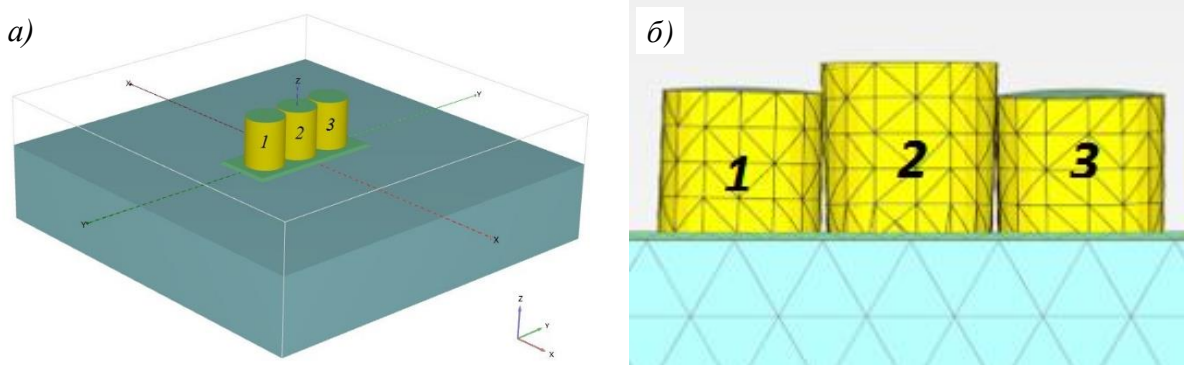


Рисунок 22 – Компоновка оболочек в протяжённом сооружении: а – геометрия модели; б – перемещение оболочек на основании при установке в последовательности 1 – 3 – 2 (условно увеличено)

В результате исследований определена рациональная схема установки оболочек в состав сооружения с точки зрения учета распределения напряжений и накопления деформаций в основании сооружения (1-3-2 на рис. 22, б). Последовательность возведения условной секции сооружения из трёх оболочек включает установку двух оболочек в линию протяжённого сооружения с соблюдением свободного расстояния между ними, достаточного для установки третьей оболочки, монтаж которой осуществляется в последнюю очередь, и так далее. При такой технологии возведения средняя оболочка, устанавливаемая последней, способствует «самовыравниванию» смонтированных ранее оболочек секции.

Автором разработано решение по технологии монтажа тонких оболочек, позволяющее обеспечить равномерное распределение нагрузки от собственного веса монтируемой оболочки по её внутренней поверхности и избежать деформаций оболочки в процессе установки в проектное положение (пат. № 2623419, пат. № 166863), предполагающее применение специальных дисков на гибких связях, снабжённых пневматическими ёмкостями (рис. 23, а).

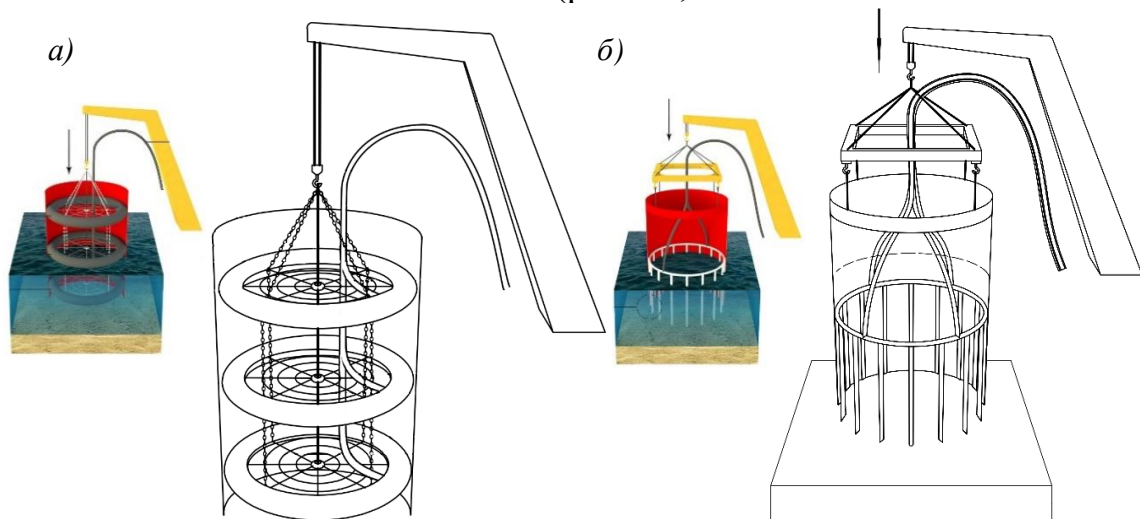


Рисунок 23 – Решения по технологии установки цельных оболочек: а – схема монтажа с помощью универсальных дисков; б – схема монтажа с подмывом

Для обеспечения установки оболочек на основание, сложенное мёрзлыми грунтами, разработано техническое решение (рис. 23, б), позволяющее погружать оболочки в основание на заданную глубину с прорезкой слабых слоёв и мёрзлых линз с помощью подмыва (пат. № 2619646), и открывающее возможности более широкого применения тонких оболочек с грунтовым наполнителем, в том числе в условиях северных морей.

Установлена рекомендуемая толщина стенки оболочки t , составляющая $0,1 \div 0,5$ % от диаметра (ширины) D . Выполнен анализ технико-экономической эффективности применения заполненных оболочек в составе гидротехнических сооружений. Установлено, что расход основных строительных материалов и трудозатраты в сравнении с оболочками из железобетона могут быть снижены до 50 %; в сравнении с другими типами железобетонных конструкций значимый экономический эффект достигается при соотношении $D/H \geq 0,5$. Показано, что при применении заполненных оболочек стоимость строительно-монтажных работ в сравнении с альтернативными конструктивными решениями снижается в среднем в $1,2 \div 1,5$ раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы, научные и практические результаты работы.

1. Разработано аналитико-численное решение для реализации модели взаимодействия элементов системы «гидротехническое сооружение-основание», составленной с использованием положений технической теории оболочек и методов численного моделирования. Для решения поставленной задачи:

- выполнен анализ основных направлений теоретических и экспериментальных исследований заполненных оболочек в области гидротехнического строительства. Показано, что в настоящее время исследования в данной области направлены на решение конкретных прикладных задач, среди которых в рамках отдельного актуального направления выделяется исследование взаимодействия тонких оболочек с внутренним наполнителем и основанием в составе гидротехнических сооружений;

- рассмотрено аналитическое решение определения напряженного и деформированного состояния цилиндрических оболочек на сжимаемом основании, основанное на технической теории оболочек В.З. Власова, при соответствующих ограничениях;

- сформирована численная модель взаимодействия тонкой цилиндрической оболочки с грунтом наполнителя и основанием для условий статического и динамического нагружения; реализована методика численного моделирования внецентренно нагруженных оболочечных конструкций с наполнителем, предназначенная к применению при построении расчётных моделей гидротехнических сооружений в специализированных программно-вычислительных комплексах;

- поставлена задача калибровки модели: для определения параметров взаимодействия на контакте оболочки и наполнителя запланирована серия экспериментов на физических моделях конструкции;

- с целью верификации численной модели поставлена задача разработки более строгой в математическом отношении теоретической модели, основанной на описании напряжённого состояния грунтового основания с учётом развития полей скольжения.

2. Разработан и апробирован метод экспериментального определения параметров модели контакта наполнителя с поверхностью оболочки. Для решения поставленной задачи:

- предложена методика сопоставления расчётных и экспериментальных перемещений характерных точек системы при условии соблюдения идентичности условий расчётного и экспериментального моделирования;

- сконструированы и применены экспериментальные установки, позволяющие проводить комплексные исследования моделей гидротехнических сооружений из заполненных оболочек на податливом основании при действии статических и динамических нагрузок;

- проведены модельные испытания конструкции внецентренно нагруженной тонкостенной цилиндрической оболочки с наполнителем на сжимаемом основании; получены опытные данные о характеристике и особенностях работы заполненной оболочки, как несущей основы гидротехнического сооружения, содержащего грунт как основной конструктивный элемент, при статическом и динамическом нагружении;

- установлен диапазон значений параметра модели, описывающего условия контакта грунта с поверхностью оболочки.

3. *Разработана теоретическая модель, функционально связывающая параметры системы «гидротехническое сооружение-основание» с максимальной нагрузкой, которую сооружение воспринимает без потери несущей способности основания.* Для решения поставленной задачи:

- разработана теоретическая модель оценки устойчивости сооружений из заполненных грунтом оболочек; в основу модели и методики расчёта положены решения о предельном напряжённом состоянии грунтового массива с дальнейшим использованием уравнений статического равновесия;

- выполнены поверочные расчёты, показавшие приемлемость предложенной базовой расчётной модели для оценки напряжённо-деформированного состояния рассматриваемых сооружений;

- показана возможность использования сравнительно простой теоретической модели на ранних стадиях проектирования для предварительного подбора параметров системы «гидротехническое сооружение-основание»; разработана и зарегистрирована компьютерная программа для ускорения и автоматизации расчёта.

4. *Построена инженерная методика расчёта и проведена апробация предложенной расчётной модели для оценки напряжённо-деформированного состояния оболочек с наполнителем при расчёте и проектировании сооружений гидротехнического и смежных областей строительства.* Для решения поставленной задачи:

- выполнен анализ нормативных методик расчёта, охватывающих процесс проектирования гидротехнических сооружений из заполненных грунтом оболочек, обозначены ограничения решаемых задач в рамках действующих норм. Поставлен ряд актуальных вопросов, касающихся совершенствования методов расчёта рассматриваемых сооружений;

- разработана классификация внецентренно-нагруженных сооружений из заполненных оболочек по признаку вовлечения грунта основания в обеспечение устойчивости. Критерий классификации отражает долю удерживающего момента на уровне подошвы, обеспечиваемого собственным весом сооружения, и относит сооружение к категории гравитационных, полугравитационных сооружений, либо тонких стенок, что позволяет предварительно определить расчётную схему сооружения, принимая во внимание как размеры конструкции, так и физико-механические свойства грунтового основания;

- установлен диапазон эффективных значений соотношений размеров оболочки с учётом деформационных свойств наполнителя из условия оптимальности распределения усилий в оболочке;

- предложена последовательность расчёта гидротехнических сооружений из внецентренно-нагруженных заполненных оболочек, установленных на грунтовом основании. Алгоритм расчёта построен на основе анализа нормативных методик расчёта, в разной степени охватывающих процесс проектирования конструкций из заполненных оболочек, с учётом результатов исследований;

- в составе общей последовательности расчёта приведены методики определения нагрузок, адаптированные применительно к заполненным оболочкам и используемые в случае отсутствия соответствующего программного инструмента при формировании численных моделей, либо как альтернатива для их проверки;

- предложенная последовательность расчётного моделирования сооружений из заполненных оболочек расширена введением процедуры проверки и редактирования параметров системы, которая предполагает увязку на ранних стадиях проектирования исходных параметров системы с заданными грунтовыми условиями (на основе предложенной теоретической модели);

- в последовательность расчёта введён модуль формирования модели напряжённо-деформированного состояния сооружения, включающий построение конечно-элементной трёхмерной модели сооружения, с последующим уточнением параметров системы и окончательным выводом о сохранении эксплуатационных качеств сооружения;

- приведена методика формирования расчётной динамической модели системы «гидротехническое сооружение-основание»; включающая способ учёта демпфирующих свойств грунта, как основного элемента системы, основанный на назначении расчётного частотного диапазона, и позволяющий определить коэффициенты Релея при заданном уровне демпфирования. Приведён пример определения предельно возможной величины сейсмичности площадки в зависимости от допустимых величин перемещений и напряжений в элементах, с учётом оценки возможности возникновения и развития зон разжижения грунта.

5. Разработаны новые технические решения оболочек как несущих конструкций гидротехнических сооружений, а также технологические приёмы их монтажа и организации взаимодействия с основанием. Для решения поставленной задачи:

- разработан способ повышения устойчивости сооружений из заполненных оболочек введением опорной консоли: предложено конструктивное решение, позволяющее обеспечить равномерное распределение напряжений в грунтовом основании на контакте с оболочкой, а также конструктивно обеспечить соблюдение расчётной глубины погружения оболочки в несущий слой грунта при её монтаже; решена задача определения оптимальной ширины опорной консоли с учётом распределения напряжений в основании заполненной оболочки;

- предложено решение по технологии монтажа оболочек в составе портовых гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечить равномерное распределение нагрузки от собственного веса монтируемой оболочки по её внутренней поверхности и избежать деформаций тонкой оболочки в процессе установки в проектное положение;

- для случая установки оболочек на основание, сложенное мёрзлыми грунтами, разработано техническое решение, позволяющее погружать оболочки в основание на заданную глубину с прорезкой слабых слоёв и мёрзлых линз и открывающее возможности более широкого применения тонких оболочек с наполнителем, в том числе в условиях северных морей;

- определена рациональная схема установки оболочек в состав протяжённого гидротехнического сооружения с учетом характера распределения напряжений и деформаций в основании;

- разработанные теоретические положения в отношении устойчивости оболочек с наполнителем реализованы в виде программы для персонального компьютера (св-во № 2020618170 от 21.07.2020), позволяющей выполнить проверку принятых параметров расчётной схемы.

Рекомендации к применению результатов.

Разработанные методики и технические решения предназначены к использованию при расчёте и проектировании выполняемых из заполненных грунтом оболочек сооружений различного назначения в гидротехническом строительстве, а также в смежных областях транспортного, промышленного и гражданского строительства. Внедрение результатов работы в виде расчётно-проектных блоков целесообразно при развитии существующих либо создании новых программных комплексов, содержащих как обоснованные теоретические зависимости для описания работы конструкций, так и элементы численного моделирования сооружений. Отдельные результаты работы в части расчёта сооружений из заполненных грунтом пустотелых блоков-оболочек представлены к внесению в СП 35.13330, СП 46.13330 «Мосты и трубы» (редакция 2022 г, ТК 465), представлены в ТК 506 к внесению в СП 381.1325800 «Сооружения подпорные. Правила проектирования».

Перспективы развития исследований.

Построенная в данной работе методика расчёта гидротехнических сооружений из заполненных грунтом оболочек позволяет обоснованно выходить за пределы традиционной области применения таких конструкций и сделать шаг вперёд в части исследований в области их расчётного моделирования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию расчётного обоснования в части назначения сооружения, материала его элементов, их компоновки, размеров и формы, инженерно-геологических условий, климатических условий применения, в том числе для строительства в сейсмоопасных регионах и в условиях побережий северных морей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. *Цимбельман, Н.Я.* Исследование напряжённо-деформированного состояния системы "тонкостенная стальная оболочка - наполнитель - грунтовое основание" / **Н.Я. Цимбельман, А.Т. Беккер** // Гидротехническое строительство. - 2023. - № 3. - С. 8-13.

2. *Цимбельман, Н.Я.* Анализ напряжённого состояния оснований сооружений из заполненных оболочек / **Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, О. Билгин** // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2022. - № 3. - С. 10-14.

3. *Цимбельман, Н.Я.* Методика расчёта и практика применения подпорных стен из блоков с грунтовым наполнителем / **Н.Я. Цимбельман**, И.В. Кузоваткин, Я.И. Котык, Д.Ю. Иванников // *Дороги и мосты*. - 2022. - № 48. - С. 167-180.

4. *Цимбельман, Н.Я.* Учёт цикличности ледовой нагрузки на сооружения из заполненных оболочек на сжимаемом основании / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, И.А. Скуртол, Т.Н. Пронкина // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. - 2021. - № 1(745). - С. 17-30.

5. *Цимбельман, Н.Я.* Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций из заполненных оболочек / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, В.С. Редько // *Вестник МГСУ*. - 2021. Т. 16. - № 7. - С. 819-827.

6. *Шалая, Т.Е.* Сравнение экономической эффективности возведения причальных стенок различных конструктивных решений / Т.Е. Шалая, **Н.Я. Цимбельман**, Е.Е. Шалый, Т.И. Чернова // *Экономика строительства*. - 2019. - № 3(57). - С. 25-36.

7. *Цимбельман, Н.Я.* Определение предельных перемещений гидротехнических сооружений из заполненных оболочек (обзор) / **Н.Я. Цимбельман**, А.М. Косикова, В. Флорес Терразас, Т.И. Чернова // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. - 2018. - № 2(35). - С. 111-119.

8. *Цимбельман, Н.Я.* Анализ методов моделирования давления обратной засыпки на сооружения из заполненных оболочек / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, П.В. Мосина // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. - 2017. - № 4(33). - С. 56-64.

9. *Беккер, А.Т.* Определение параметров и верификация математической модели конструкций из заполненных оболочек на сжимаемом основании / А.Т. Беккер, **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. - 2016. Т. 280. - С. 10-23.

10. *Цимбельман, Н.Я.* Метод расчёта предельных нагрузок на сооружения из заполненных цилиндрических оболочек / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления* - 2016. - № 3(60). - С. 32-38.

11. *Чернова, Т.И.* Цилиндрические оболочки с внутренним наполнителем в практике геотехнического строительства / Т.И. Чернова, **Н.Я. Цимбельман** // *Научный вестник Воронежского ГАСУ*. - 2016. - № 1(41). - С. 11-20.

12. *Цимбельман, Н.Я.* Параметры математической модели цилиндрических оболочек большого диаметра с наполнителем / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, А.А. Шмыков // *Региональная архитектура и строительство*. - 2015. - № 4(25). - С. 65-73.

13. *Цимбельман, Н.Я.* Применимость теорий расчёта цилиндрических оболочек с наполнителем / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Е.К. Борисов, Ю.Б. Киргинцева, А.А. Павленко // *Архитектура и строительство Дальнего Востока: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Отдельные статьи (специальный выпуск). - 2014. - № 12. - С. 156-167.

14. *Мамонтов, А.И.* Верификация численной модели цилиндрической оболочки с наполнителем / А.И. Мамонтов, **Н.Я. Цимбельман**, Е.В. Квон, Т.И. Чернова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2014. - № 37(56). - С. 154-161.

15. *Мамонтов, А.И.* Устойчивость подпорного сооружения гравитационного типа на податливом основании / А. И. Мамонтов, **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова // Морские интеллектуальные технологии. - 2014. Т. 1. - № 3 (25). - С. 16-25.

16. *Цимбельман, Н.Я.* Математическая модель оболочки с наполнителем к расчёту гидротехнических сооружений / **Н.Я. Цимбельман**, Д.А. Потянихин, А.И. Мамонтов, Т.И. Чернова, Е.В. Квон, И.Г. Кузнецов // Вестник ТОГУ - 2013. - № 4(31). - С. 43-50.

17. *Беккер, А.Т.* Исследования напряжённо-деформированного состояния оболочечных конструкций с наполнителем / А.Т. Беккер, **Н.Я. Цимбельман**, В.И. Селивёрстов, Т.И. Чернова // Вестник ИРГТУ - 2013. - № 8. - С. 64-70.

18. *Мамонтов, А.И.* Численное моделирование разрушения грунта в условиях плоского среза / А.И. Мамонтов, **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова // Вестник гражданских инженеров. - 2013. - № 5(40). - С. 101-107.

19. *Цимбельман, Н.Я.* Модельные исследования напряжённо-деформированного состояния оболочек большого диаметра с наполнителем / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова // Вестник МГСУ. - 2012. - № 12. - С. 71-77.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

20. *Bekker, A.* Method for Compaction Control of Artificial Foundations with Coarse Clastic Soils / A. Bekker, **N. Tsimbelman**, O. Gusev, // XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022". Lecture Notes in Networks and Systems, Springer. - 2023. - Vol. 574. - pp. 2339-2348.

21. *Tsimbelman, N.Y.* Stress-Strain State of Soils Under Thin Shell Structures with Infill. / **N.Y. Tsimbelman**, T.I. Chernova, M.A. Selivanova et al. // Soil Mech Found Eng. - 2022. - # 59. - pp. 239-244.

22. *Tsimbelman, N.Y.* Classification of Infilled Shells Structures Considering Soil-Construction Interaction / **N.Y. Tsimbelman**, T.I. Chernova, I.V. Kuzovatkin, T.N. Pronkina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2022. - # 988. - 052046.

23. *Koshurnikov, A.V.* Submarine Permafrost in the Laptev Sea/ A.V. Koshurnikov, V.E. Tumskoy, V.V. Skosar, Y.O. Efimov, K.A. Kornishin, A.T. Bekker, Y.G. Piskunov, **N.Y. Tsimbelman**, D.A. Kosmach // International Journal of Offshore and Polar Engineering. - 2020. – Vol. 30, Issue 1. - pp. 86-93.

24. *Tsimbelman, N.Y.* Model Pilot Study Statement of Filled Shells Constructions under Dynamic Impact/ **N.Y. Tsimbelman**, T.E. Shalaia, T.I. Chernova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 753. Iss. 5, # 052036.

25. *Tsimbelman, N.* Definition of Limit Displacements for Structures Made from In-filled Shells used in a Coastal Engineering (Review) / **N. Tsimbelman**, A. Kosikova, V. Flores, T. Chernova, A. Trapeznikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - 272(3), 032251.

26. *Bilgin, Ö.* Variability in recompression index obtained from incremental consolidation tests / **Ö. Bilgin**, **N. Tsimbelman**, T. Chernova. // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ICSMGE. - 2017. - pp. 317-320.

27. *Tsimbelman, N.Y.* Engineering analysis methods for hydraulic shell structures with infill / **N.Y. Tsimbelman**, T.I. Chernova, T.E. Shalaya // International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017, Saint Petersburg; Russian Federation. - 2017. - Vol. 265. pp. 779-784.

28. *Tsimbelman, N.Ya.* Effect of Ice Load on Offshore Cellular Structures with Infill on Compressible Soil / **N.Ya. Tsimbelman**, T.I. Chernova, St. Giese, C. Athanasiu // Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA. - 2017. - pp. 593-601.

29. *Tsimbelman, N.Ya.* Theoretical model for the stability of soils under shell gravity structures. / **N.Ya. Tsimbelman**, T.I. Chernova, **Ö. Bilgin** // Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference - Rhodes, Greece, ISOPE. - 2016. pp. 789-796.

30. *Tsimbelman, N.Ya.* Stability of Thin Shell with Infill Gravity Structures against Lateral Loads / **N.Ya. Tsimbelman**, A.I. Mamontov, T.I. Chernova, **Ö. Bilgin** // From Fundamentals to Applications in Geotechnics. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15-18 November 2015, Buenos Aires, Argentina - IOS Press, 2015. - pp. 1081-1088.

31. *Bekker, A.T.* Interface Friction Parameters for the Mathematical Modeling of Shell Structures with Infill. / A.T. Bekker, **N.Ya. Tsimbelman**, T.I. Chernova, V.D. Bruss // Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona, Big Island, Hawaii, USA. - 2015. - pp. 1905-1912.

32. *Mamontov, A.I.* Stability of Retaining Wall of Gravitational Type on the Compressive Bedding Soil / A.I. Mamontov, **N.Ya. Tsimbelman**, T.I. Chernova // Marine Intellectual Technologies. - 2014. - 1 #3. pp. 16-24.

33. *Bekker, A.T.* Mathematical Model of the Shell with the Infill for Retaining Structures / A.T. Bekker, **N.Ya. Tsimbelman**, D.A. Potyanikhin, A.I. Mamontov, **Ö. Bilgin**, T.I. Chernova // Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan, Korea. - 2014. - pp. 905-910.

34. *Chernova, T.I.* Assignment of Tasks for Experimental Research of Large-Diameter Thin Shells with Infill / T.I. Chernova, **N.Ya. Tsimbelman** // Proceedings of The Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. - 2012. - pp. 203-207.

35. *Bekker, A.T.* The mode of deformation status of the offshore pile structures with low-rigid raft foundations / A.T. Bekker, **N.Ya. Tsimbelman** // Proceedings of The Ninth (2010) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. - 2010. - pp. 359-362.

Объекты интеллектуальной собственности и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

36. Пат. 2764900 РФ, МПК, E02D 5/38. Свая с оболочкой / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Л.В. Аветян, И.В. Кузоваткин, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2021118846; заявл. 29.06.2021, опубл. 24.01.2022. Бюл. №3.

37. Пат. 208746 РФ, МПК, E02D 5/00. Свая с оболочкой / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Л.В. Аветян, И.В. Кузоваткин, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2021118847; заявл. 29.06.2021, опубл. 11.01.2022. Бюл. №2.

38. Пат. 2700833 РФ, МПК, G01M 7/02. Сейсмоплатформа / **Н.Я. Цимбельман**, И.Г. Кузнецов, Т.Е. Шалая, Т.И. Чернова, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2019107902; заявл. 20.03.2019, опубл. 23.09.2019. Бюл. №27.

39. Пат. 184231 РФ, МПК, E02B 3/06. Оболочка большого диаметра / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, И.В. Кузоваткин, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2018121768; заявл. 15.06.2018, опубл. 18.10.2018. Бюл. №29.

40. Пат. 2619646 РФ, МПК, E02D 7/00. Устройство для установки тонкой стальной оболочки на дне акватории / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Л.З. Эстрин, С.Ч. Кон, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2016113542; заявл. 11.04.2016, опубл. 17.05.2017. Бюл. №14.

41. Пат. 2623419 РФ, МПК, B66C 1/12. Траверса для монтажно-стыковочных работ с крупногабаритными оболочками / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Т.В. Сивова, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2016113770; заявл. 12.04.2016, опубл. 26.06.2017. Бюл. №18.

42. Пат. 166863 РФ, МПК, B66C 1/12. Траверса для монтажно-стыковочных работ с крупногабаритными оболочками / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, Т.В. Сивова, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2016113771/11; заявл. 12.04.2016, опубл. 10.12.2016. Бюл. №34.

43. Пат. 2463408 РФ, МПК, E02B 3/06. Оболочка большого диаметра с опорным кольцом / **Н.Я. Цимбельман**, А.Т. Беккер, Д.А. Храмцов, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2011111900/13; заявл. 29.03.2011, опубл. 10.10.2012. Бюл. №28.

44. Пат. 109158 РФ, МПК, E02B 3/06. Оболочка большого диаметра с опорным кольцом / **Н.Я. Цимбельман**, А.Т. Беккер, Д.А. Храмцов, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2011112876/13; заявл. 04.04.2011, опубл. 10.10.2011. Бюл. №28.

45. Пат. 85502 РФ, МПК, E02D 29/02. Подпорная стенка / **Н.Я. Цимбельман**, Л.З. Эстрин, ДВПИ им. В.В. Куйбышева. – 2009104484/22; заявл. 10.02.2009, опубл. 10.08.2009. Бюл. №22.

46. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020618170 РФ. Программа оценки устойчивости оболочек с наполнителем из условия обеспечения несущей способности основания / **Н.Я. Цимбельман**, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, П.В. Нечаев, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2020613463; заявл. 18.03.2020, опубл. 21.07.2020.

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАПОЛНЕННЫХ ГРУНТОМ ОБОЛОЧЕК**

Специальность 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика
и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать __.__.20__ г. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. __, __
Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано в типографии _____