

На правах рукописи



Акулич Владимир Юрьевич

**Напряженно-деформированное состояние и устойчивость  
равновесия цилиндрических оболочек при упругих  
и упруго-пластических деформациях, в том числе  
взаимодействующих с окружающим основанием,  
с учетом изменения расчетной модели во времени**

2.1.9. Строительная механика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель:	советник РААСН, доктор технических наук, профессор <b>Косицын Сергей Борисович</b>
Официальные оппоненты:	<b>Демьянушко Ирина Вадимовна</b> , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), кафедра «Строительная механика», профессор <b>Леонтьев Андрей Николаевич</b> , кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра «Сопроотивление материалов», доцент
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Защита состоится 30 марта 2022 г., в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (7-й корпус РУТ (МИИТ), Минаевский пер., д. 2, ауд. 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miiit.ru](http://www.miiit.ru).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Шавыкина Марина Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Тонкостенные элементы – оболочки широко применяются в современных строительных конструкциях. Их используют в транспортном, промышленном и гражданском строительстве при сооружении башен, опор, резервуаров, сводов, тоннелей и т. д.

Оболочки имеют ряд преимуществ: они способны эффективно воспринимать приложенную нагрузку за счет своей геометрической формы, эстетичны и предпочтительны с архитектурной точки зрения.

Особую роль оболочечные элементы играют в подземных сооружениях, где часто используют цилиндрические и другие сводчатые поверхности. При достаточно широком исследовании особенностей работы цилиндрических оболочек остаются вопросы по учету влияния контактного взаимодействия оболочки и основания, нелинейности происходящих процессов и изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки в ходе ее монтажа, что не позволяет дать реальную оценку НДС и устойчивости таких конструкций от начала строительных работ до их завершения. Это предопределяет актуальность темы исследования по развитию методов расчета оболочек, взаимодействующих с окружающим основанием, на прочность, устойчивость и жесткость.

**Степень разработанности темы исследования.** Общая теория оболочек существует с начала XX века. За прошедшее время отечественными и зарубежными учеными А. В. Александровым, С. А. Алексеевым, Н. А. Алумяэ, С. А. Амбарцумяном, В. В. Болотиним, В. З. Власовым, А. С. Вольмиром, И. И. Воровичем, И. Г. Галеркиным, К. З. Галимовым, А. Л. Гольденвейзером, Э. И. Григолоком, Г. Ю. Джанелидзе, Л. Г. Доннеллом, Е. М. Зверяевым, Р. Кларком, А. И. Лурье, Э. Мейснером, Х. М. Муштари, В. В. Новожиловым, Э. Рейснером, С. П. Тимошенко, В. И. Феодосьевым, И. С. Цурковым, К. Ф. Черныхом и другими проделана огромная работа по совершенствованию и уточнению теории.

Большую роль в развитии теории оболочек сыграло появление вычислительной техники. Это потребовало поиска новых методов расчета и переоценки существующих. Наибольшее распространение среди численных методов определения НДС оболочек получил метод конечных элементов (МКЭ). Основные положения МКЭ изложены в работах следующих отечественных и зарубежных исследователей: М. Р. Айронса, Дж. Аргириса, К. Бате, А. М. Белостоцкого, Д. В. Вайнберга, Е. Вилсона, А. И. Голованова, Ж. Деклу, И. В. Демьянушко, У. М. Дженкинса, О. К. Зенкевича, В. Н. Иванова, Р. Клафа, С. Б. Косицына, Х. Мартина, Дж. Одена, Л. А. Розина, Ф. Сьярле, М. Тернера, С. И. Трушина, Н. Н. Шапошникова и других.

Весомый вклад в разработку конечных элементов, способных корректно описать работу оболочки, внесли: Ф. Богнер, Р. Галлагер, А. С. Городецкий, Д. Кантин, А. Б. Сабир, Р. Фокс, Л. Шмит, Д. Эшвел и другие.

Другим численным методом, часто применяющимся для определения НДС оболочек, является метод конечных разностей (МКР), который описан в работах П. А. Акимова, П. М. Варвака, Р. Ф. Габбасова, А. Б. Золотова, Б. Я. Лашеникова, М. Л. Мозгалевой, В. Н. Сидорова, Р. П. Федоренко, В. Хакбуша и других.

Исследованиям взаимодействия конструкций с деформируемым основанием посвящены работы следующих авторов: А. Б. Айнбиндера, Е. С. Ашпиза, В. В. Виноградова, А. Л. Готмана, Н. З. Готман, Г. К. Клейна, С. Н. Клепикова, Б. Г. Коренева, Э. К. Кузахметовой, Е. Н. Курбацкого, А. Н. Леонтьева, Н. Н. Леонтьева, В. Л. Мондруса, Н. С. Никифоровой, Д. В. Панфилова, П. Л. Пастернака, Г. Н. Савина, А. М. Силкина, А. Н. Сонины, В. Г. Храпова, Т. В. Шепитько и других.

Учет нелинейных свойств материалов, в том числе для систем «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», рассмотрен в трудах В. С. Бондаря, Л. А. Галина, А. А. Ильюшина, А. Ю. Ишлинского, А. Надаи, Г. А. Наумовой, В. Прагера, А. Altaee, В. Н. Fellenius, А. Nobahar, R. Phillips и других.

Вопросами устойчивости стержневых и оболочечных элементов конструкций, в том числе с учетом физической и геометрической нелинейностей, занимались следующие ученые: В. В. Галишникова, И. Д. Грудев, В. Б. Зылев, И. Иошимура, С. Н. Кривошапко, Г. А. Мануйлов, В. Б. Мещеряков, А. В. Перельмутер, А. В. Погорелов, В. Д. Потапов, А. Ф. Смирнов, Дж. Хаддлстон, Н. Дж. Хофф и другие.

Тем не менее до сих пор существует необходимость в разработке методов расчета систем «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» в нелинейных постановках задач и с учетом изменения расчетной модели во времени для увеличения области приложения классической теории.

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке и развитии методов расчета и анализе напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, взаимодействующих с окружающим основанием, в плоской и пространственной постановках задач.

#### **Задачи исследования.**

1. Разработка численной методики учета строительного зазора между цилиндрической оболочкой и окружающим основанием, а также анализ влияния этого зазора на НДС системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», в частности на перемещения верхней поверхности основания.

2. Определение размеров пространственного фрагмента системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», необходимых для получения достоверных результатов расчета осадки верхней поверхности основания, вызванной наличием зазора между оболочкой и основанием.

3. Разработка программы для автоматизации процесса создания твердотельной расчетной модели системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» с возможностью учета строительного зазора между оболочкой и основанием.

4. Разработка методики и анализ влияния учета поэтапного возведения цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, на НДС системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» с использованием расчетной модели, изменяющейся во времени, с односторонним контактным взаимодействием между оболочкой и основанием при упруго-пластических моделях материала оболочки и основания.

5. Разработка методики определения критической нагрузки и форм потери устойчивости равновесия цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, при различных моделях материала оболочки и основания и условиях контактного взаимодействия с учетом геометрической нелинейности. Сравнительный анализ полученных результатов.

6. Применение разработанных методик для решения практических задач расчета цилиндрических оболочек, взаимодействующих с окружающим основанием.

**Научная новизна исследования** состоит в оценке НДС и устойчивости цилиндрических оболочек с учетом взаимодействия с окружающим основанием и этапности строительства, а именно:

1. Построены конечно-элементные модели системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», изменяющиеся во времени, учитывающие зазор между оболочкой и основанием на этапе строительства с помощью одностороннего контактного взаимодействия и физическую нелинейность материалов.

2. Определены размеры пространственного фрагмента системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», необходимые для получения достоверных результатов расчета осадки верхней поверхности основания.

3. Разработан и реализован алгоритм оценки НДС и устойчивости системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание».

4. Программа на языке PCL в программном комплексе PATRAN для автоматизации процесса создания твердотельной расчетной модели системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» с возможностью учета строительного зазора между оболочкой и основанием при одностороннем контактном взаимодействии.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Методики и алгоритмы расчета системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» с учетом строительного зазора между оболочкой и основанием на этапе строительства можно использовать в расчетах подземных сооружений.

2. Расчетные модели, методики и алгоритмы, позволяющие учесть разное количество этапов возведения цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, можно применять при расчетах цилиндрических оболочек, возводимых в несколько стадий.

3. Программа для автоматизации процесса создания твердотельной расчетной модели системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» возможно использовать в расчетах подземных сооружений, особенно в случае необходимости большого числа вариантов расчетных моделей.

4. Рекомендации по выбору размеров пространственного фрагмента системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание», необходимых для получения достоверных результатов расчетов осадки верхней поверхности массива основания.

5. Рекомендации по выбору минимально необходимого количества расчетных стадий возведения оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, в практических расчетах по определению НДС системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание».

6. Определено влияние учета контактного трения и упруго-пластической модели материала цилиндрической оболочки, поэтапно возводимой в массиве основания, на ее НДС.

7. Методика определения и полученные величины критических нагрузок, при которых конструкция цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, теряет устойчивость равновесия, могут быть использованы при проектировании подземных тоннелей различного назначения.

8. Результаты работы уже нашли практическое применение при проектировании перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена (от станции «Раменки» до станции «Рассказовка»), расположенных под существующими железнодорожными путями Московской железной дороги на участке станция «Солнечная» – остановочный пункт «Новопеределкино». Соответствующий акт о внедрении результатов диссертационной работы приведен в Приложении 3.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач применен метод конечных элементов в перемещениях, включающий построение расчетных моделей рассматриваемых систем, их численные линейный и геометрически, физически и конструктивно нелинейный анализы. С целью учета развития пластических деформаций материалов использована теория пластического течения с критериями пластичности Мора – Кулона и Друкера – Прагера.

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

1. Пространственные расчетные модели, методики и алгоритмы для определения НДС системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» и осадки верхней поверхности массива основания с учетом зазора между цилиндрической оболочкой и окружающим основанием на этапе строительства с помощью одностороннего контактного взаимодействия.

2. Оценка влияния размеров пространственного фрагмента системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» на его НДС и рекомендации по выбору характерных размеров такого фрагмента для расчета осадки верхней поверхности массива основания.

3. Программа (на языке PCL в программном комплексе PATRAN), позволяющая автоматизировать процесс создания твердотельной расчетной модели системы «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» с возможностью учета строительного зазора между оболочкой и основанием при одностороннем контактном взаимодействии.

4. Пространственные расчетные модели, изменяющиеся во времени, методика и алгоритм, позволяющие учесть разное количество этапов возведения цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, при различных моделях материала оболочки и основания и рекомендации по выбору минимально необходимого количества расчетных стадий возведения оболочки при определении НДС.

5. Оценка влияния учета контактного трения и упруго-пластической модели материала цилиндрической оболочки, поэтапно возводимой в массиве основания, на ее НДС.

6. Методика, алгоритм и оценка критических нагрузок и форм потери устойчивости цилиндрической оболочки, полученных при различных моделях материала оболочки и основания и условиях контактного взаимодействия с окружающим основанием, с учетом геометрической нелинейности.

7. Анализ результатов численного решения практической задачи, а именно НДС четырех перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена от станции «Раменки» до станции «Рассказовка», расположенных под существующими железнодорожными путями Московской железной дороги на участке станция «Солнечная» – остановочный пункт «Новопеределкино».

**Достоверность результатов работы** обеспечена корректностью постановок задач, сформулированных и решенных на основе общих теоретических положений строительной механики и механики деформируемого твердого тела; применением известных численных методов, реализованных в верифицированных программных комплексах MSC PATRAN – NASTRAN и ANSYS Mechanical; согласованностью результатов численного анализа с известным обобщенным полуэмпирическим методом, а также хорошей сходимостью тестовых численных расчетов с точными аналитическими решениями.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы доложены и опубликованы в следующих трудах и тезисах докладов научно-технических конференций российского и международного уровня.

1. VII и VIII Международные научные конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»). Москва, РААСН 2018 и 2019 г.

2. Международная конференция «Modelling and methods of structural analysis». Москва, МГСУ 2019 г.

3. 76, 77 и 78 Международные научно-методические и научно-исследовательские конференции МАДИ. Подсекция «Строительная механика машин и конструкций». Москва, МАДИ 2018, 2019 и 2020 г.

4. 43 Межвузовский научный семинар «Геометрия и расчет тонких оболочек неканонической формы». Москва, РУДН 2019 г.

5. XIX, XX и XXI Международные конференции «Компьютерные системы инженерного анализа MSC Software». Москва 2016, 2017 и 2018 г.

6. Конференции «Неделя науки. Наука МИИТа – транспорту». Москва, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ) 2017, 2018, 2019 и 2020 г.

7. XV Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Москва, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ) 2018 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 17 печатных работах. Из них 5 опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, и 4 опубликованы в изданиях, входящих в международные базы Web of Science и Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 333 наименования, и трех приложений. Общий объем составляет 273 страницы и включает 134 рисунка, 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, обозначены цель и задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также изложены основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** изложен обзор и анализ состояния изучаемого вопроса, на основе которых сформированы цель и задачи исследования.

Определено, что традиционная теория тонких оболочек основана на гипотезах Кирхгофа – Лява и имеет несколько направлений развития. Появление ЭВМ привело к созданию новых методов расчета оболочек и переоценке существующей теории. Среди численных методов можно выделить МКР и особенно МКЭ, как самый распространенный.

Методика определения НДС пространственных систем «цилиндрическая оболочка – окружающее основание» имеет долгую историю развития, однако до сих пор существует ряд нерешенных проблем, которые связаны преимущественно с нелинейным характером происходящих в данной системе процессов.

Установлено, что проблема учета стадий возведения оболочечных конструкций весьма актуальна и востребована, так как основная часть исследований НДС оболочечных конструкций состоит из расчетов в одну стадию, что в большинстве случаев не отражает действительности, когда оболочка сооружена за несколько этапов.

Также определено, что большое внимание уделено проблемам устойчивости тонкостенных оболочек при различных видах нагрузок, в то же время вопросы устойчивости системы «оболочка – основание» изучены недостаточно полно.

В главе отмечена важность учета геометрической и физической нелинейности при решении поставленных задач, которые позволяют намного точнее описывать работу тонкостенных оболочек, в том числе цилиндрических.

**Во второй главе** изложены теоретические основы численного моделирования систем «цилиндрическая оболочка – окружающее основание».

В начале главы рассмотрены основные дифференциальные уравнения для цилиндрической круговой оболочки, записанные в криволинейных ортогональных координатах.

Далее приведены основные положения МКЭ, позволяющего находить приближенные численные решения различных задач строительной механики. Для



примера рассмотрены матрицы жесткости некоторых конечных элементов, позволяющих моделировать систему «оболочка – основание». В большинстве практических задач цилиндрические оболочки рассчитывают с использованием плоских прямоугольных конечных элементов, испытывающих деформации в своей плоскости и из плоскости.

При сильном изменении геометрической формы конструкций (например, в задачах устойчивости) необходимо учитывать геометрическую нелинейность, которая характеризуется большими перемещениями и (или) поворотами.

На каждом шаге нелинейного статического анализа решается матричное уравнение:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{R} + \mathbf{R}_\sigma]\mathbf{z} = [\mathbf{R}_L + \mathbf{R}_N + \mathbf{R}_\sigma]\mathbf{z} = \mathbf{R}_\tau\mathbf{z}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{P}$  – вектор внешних нагрузок;  $\mathbf{R}$  – матрица больших перемещений, являющаяся суммой линейной матрицы жесткости при малых деформациях  $\mathbf{R}_L$  и нелинейной матрицы жесткости при больших перемещениях  $\mathbf{R}_N$ ;  $\mathbf{R}_\sigma$  – матрица жесткости начальных напряжений, которую необходимо учитывать в нелинейном итерационном процессе;  $\mathbf{z}$  – вектор перемещений;  $\mathbf{R}_\tau$  – полная матрица тангенциальных жесткостей.

В этой же главе изложены основные положения теории пластического течения. Условие текучести можно записать через инварианты тензора напряжений следующим образом:

$$f(\sigma, I_2(T_\sigma), I_3(T_\sigma)) = K, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднее (гидростатическое) давление в точке;  $I_2(T_\sigma)$  и  $I_3(T_\sigma)$  – второй и третий инварианты тензора напряжений соответственно;  $K$  – константа материала, связанная с пределом текучести.

Рассмотрены наиболее известные условия текучести для однородного изотропного материала и для материала с разным сопротивлением растяжению и сжатию. Приведен преобразованный вид рассмотренных условий текучести, наиболее удобный для применения в численных расчетах. Показаны особенности формирования матрицы жесткости и упруго-пластической матрицы при учете физической нелинейности.

Далее кратко описано моделирование контактных задач. Проблема контакта имеет большое значение при моделировании систем «оболочка – основание». Контакт отнесен к конструктивной нелинейности типа изменения статуса. Для примера в приложении диссертации приведено описание контактных элементов, использованных в данной работе для реализации одностороннего контактного взаимодействия.

Также в главе рассмотрено решение нелинейных алгебраических уравнений в задачах строительной механики. Для примера рассмотрено применение шаговой процедуры приложения нагрузки совместно с итерационным методом Ньютона – Рафсона, который имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{z}_k - \mathbf{R}_\tau^{-1}(\mathbf{z}_k)\delta_k; \\ \delta_k &= \mathbf{P} - \mathbf{R}_\tau(\mathbf{z}_k)\mathbf{z}_k, k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{z}_{k+1}$  – вектор искомых узловых перемещений итерации  $k+1$ ;  $\mathbf{R}_T(\mathbf{z}_k)$  – полная матрица тангенциальных жесткостей;  $\delta_k$  – вектор невязки узловых сил, полученный на итерации  $k$ ;  $\mathbf{z}_k$  – вектор узловых перемещений итерации  $k$ .

Кроме того, в рамках второй главы описан метод «длины дуги» (Arc Length Method), применяемый для решения систем нелинейных уравнений в случае появления критических точек на кривой равновесных состояний.

Расчет на устойчивость в линейной постановке (проблема собственных значений) выглядит следующим образом:

$$\mathbf{R}\phi = \lambda \mathbf{S}\phi, \quad (4)$$

где  $\mathbf{R}$  – матрица жесткости системы;  $\mathbf{S}$  – матрица геометрической жесткости;  $\lambda$  – собственные значения (критические нагрузки);  $\phi$  – собственные векторы (формы потери устойчивости).

Решение задач на собственные значения выполнено с помощью блочной версии метода Ланцоша с использованием сдвигов.

**В третьей главе** предложена численная методика оценки НДС массива, моделирующего грунтовое основание, в частности определения осадок поверхности массива, вызванных сооружением круговой цилиндрической оболочки, моделирующей перегонный тоннель, внутри массива.

В процессе ведения работ тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК) происходит смещение породы в сторону тоннеля. Таким образом, количество породы, которое удалено из подземного пространства, всегда больше, чем теоретическое, посчитанное, исходя из проектного профиля тоннеля. Дополнительный объем породы, извлеченный из подземного пространства, носит название «потерянный объем». «Потерянный объем» служит мерой нарушенности массива проходческими работами и вызывает развитие мутьды оседания земной поверхности.

Разработана и реализована методика, основанная на пространственных расчетных моделях с использованием двух способов создания зазора между цилиндрической оболочкой и окружающим массивом, позволяющая учитывать «потерянный объем» грунта от работы ТПМК.

Моделирование и расчеты выполнены в современном конечно-элементном программном комплексе MSC PATRAN – NASTRAN в физически и конструктивно нелинейных постановках задачи.

Материал оболочки принят неограниченно линейно упругим. Физико-механические свойства оболочки соответствуют свойствам бетона: модуль упругости  $E_{об} = 3.8 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_{об} = 0.2$ , плотность  $\rho_{об} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Габариты оболочки приняты по типовому проекту: диаметр – 5.0 м; толщина – 0.25 м. Материал массива задан упруго-пластической моделью Друкера – Прагера (D. C. Drucker, W. Prager). Физико-механические свойства массива приняты следующими: модуль деформации  $E_{сп} = 30$  МПа, коэффициент поперечной деформации  $\mu_{сп} = 0.3$ , плотность  $\rho_{сп} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, сцепление  $C = 10$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi = 20^\circ$ . Нагрузку составляет собственный вес оболочки и основания.

В первом способе, где зазор задан слоем объемных конечных элементов, модуль деформации элементов определен итерационным методом: уменьшение значения модуля происходит до тех пор, пока зазор у нижнего свода оболочки не

будет перекрыт полностью. По результатам расчета максимальная осадка над осью оболочки составила – 1.68 см в нижнюю сторону. Во втором способе зазор задан одномерными контактными элементами GAP, жесткости которых устремлены к бесконечности при сжатии ( $K_a = 1 \cdot 10^7$  Н/м) и к нулю при растяжении ( $K_b = 1 \cdot 10^{-7}$  Н/м). Максимальная осадка над осью оболочки составила – 3.60 см в нижнюю сторону.

После определения осадки поверхности массива в поперечном направлении к оси оболочки то же самое проделано для продольного направления. В предложенной расчетной модели оболочка задана на половину длины массива (полная длина массива составляет  $10D$ , где  $D$  – диаметр оболочки) для исследования осадок поверхности вдоль оси оболочки, однако, с такой моделью возможно определять вертикальные перемещения и в поперечном направлении, что позволяет увидеть общую картину развития мульды осадки.

Далее проведен сравнительный анализ полученных результатов с известным аналитическим полуэмпирическим методом определения мульды оседания земной поверхности Р. В. Attewell и J. Р. Woodman. Кривые мульды осадок в поперечном и продольном направлениях к оси оболочки, полученные численным и обобщенным полуэмпирическим методами, показаны на рисунках 1 и 2.

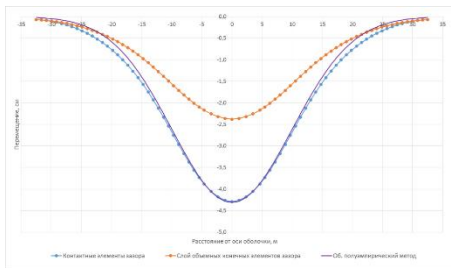


Рисунок 1. Кривые мульды осадок в поперечном направлении

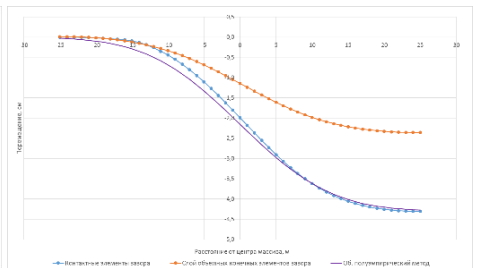


Рисунок 2. Кривые мульды осадок в продольном направлении

К результатам расчетных моделей, учитывающих «потерянный объем» грунта, добавлена кривая выгиба, полученная в расчетной модели без учета зазора, так как метод Р. В. Attewell и J. Р. Woodman не учитывает разгрузку нижележащих слоев основания, вызванную превышением веса объема выбранного грунта над силой тяжести смонтированной оболочки тоннеля.

Расхождение максимальной осадки поверхности массива над осью оболочки, полученной обобщенным полуэмпирическим методом, с максимальной осадкой расчетной модели со слоем объемных конечных элементов зазора составляет 44%, с максимальной осадкой расчетной модели с контактными элементами зазора – 1%. Это говорит о хорошей сходимости результатов второго подхода с известным обобщенным полуэмпирическим расчетом и о корректной работе предложенной расчетной модели с контактными элементами, которая использована в дальнейших расчетах по определению осадки поверхности массива в поперечном и продольном направлениях к оси оболочки.

В этой же главе приведены результаты исследования, позволившего определить размеры фрагмента массива, необходимые для достоверного расчета осадки верхней поверхности в поперечном и продольном направлениях к оси оболочки по разработанным расчетным моделям, учитывающим зазор (рисунки 3 и 4).

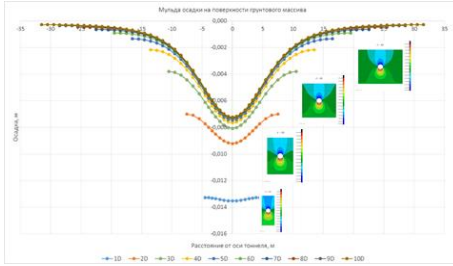


Рисунок 3. Кривые мульды осадок в поперечном направлении при различных размерах фрагмента массива

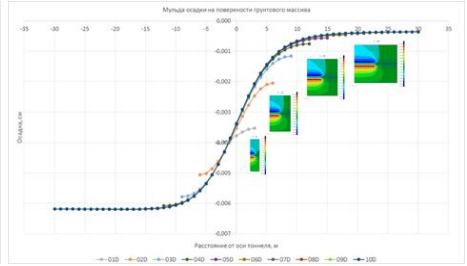


Рисунок 4. Кривые мульды осадок в продольном направлении при различных размерах фрагмента массива

С учетом полученных результатов расчетов НДС системы можно рекомендовать в практических расчетах принимать расстояние  $L$  от края оболочки до боковых торцов массива, удовлетворяющее условию  $L \geq 5D$ , где  $D$  – диаметр оболочки. В рамках данного исследования написана и реализована программа (рисунок 5) для автоматизации процесса создания твердотельной расчетной модели цилиндрической оболочки, окружающего массива и контактных элементов зазора на командном языке PCL. Описание и полный текст программы приведены в приложении диссертации.

Далее изложены результаты практического применения разработанных методик при определении мульды оседания участка поверхности земли с эксплуатируемыми железнодорожными путями, расположенного в пределах зоны влияния строительства проектируемых перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена. Выполнен сравнительный анализ для полученных из численного расчета с использованием контактных элементов зазора максимальных перемещений поверхности (рисунок 6) и результатов геодезического мониторинга, в котором между ними выявлена хорошая сходимость.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования влияния учета поэтапного возведения конструкции на НДС цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, с использованием численных методов. Рассмотрено контактное взаимодействие цилиндрической оболочки конечных размеров с окружающим объемным массивом как без учета, так и с учетом трения между объектами. Модель материала массива описана соотношениями Мора – Кулона (O. Mohr, C. A. Coulomb), а материал оболочки рассмотрен в двух вариантах: как линейный и как модель Друкера – Прагера.

Для решения наследственной пространственно-временной задачи определения НДС цилиндрической оболочки и окружающего основания разработана методика, основанная на возможностях программного комплекса ANSYS.



Рисунок 5. Интерфейс программы

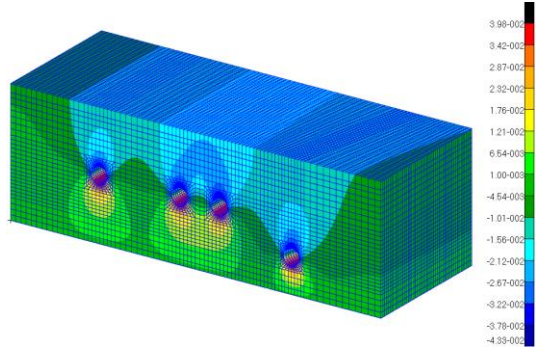


Рисунок 6. Поле вертикальных перемещений массива

Предложенная пространственная твердотельная расчетная модель состоит из цилиндрической оболочки и окружающего основания (рисунок 7). Диаметр цилиндрической оболочки составляет  $D = 3$  м, толщина оболочки  $t = 0.3$  м, расстояние между боковыми краями оболочки и боковыми торцами основания составляет  $W = 5D$ , расстояние от верхнего и нижнего краев оболочки до верхнего и нижнего торцов основания составляет  $H = 5D$ . Цилиндрическая оболочка составлена из 32 отдельных колец шириной 1 м, основание в месте расположения колец оболочки также разделено на 32 части в виде цельных цилиндров шириной 1 м. Перед включением в работу кольца оболочки необходимо отключить часть основания, которая будет замещена активированным кольцом. В расчетной модели задан зазор между цилиндрической оболочкой и окружающим основанием для учета особенностей работы ТПКМ.

Упругопластическая модель Мора – Кулона использована для материала основания со следующими параметрами: модуль деформации  $E_{cp} = 10 \cdot \text{МПа}$ , коэффициент поперечной деформации  $\mu_{cp} = 0.3$ , плотность  $\rho_{cp} = 2000 \text{ кг/м}^3$ , сцепление  $C = 10 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 25^\circ$ . Идеальная упругая модель принята для материала цилиндрической оболочки со следующими параметрами: модуль упругости  $E_{об} = 3.0 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\mu_{об} = 0.2$ , плотность  $\rho_{об} = 2300 \text{ кг/м}^3$ . Модель материала основания предполагает расчет в физически нелинейной постановке. Нагрузку составляет собственный вес оболочки и основания.

Расчет проведен в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановках.

Реализовано шесть расчетных случаев с разным количеством стадий: 32, 16, 8, 4, 2 и 1 стадиями расчета. В каждом расчете дополнительно одна стадия (нулевая) отведена на определение бытового состояния основания. По полученным результатам расчета выполнен сравнительный анализ эквивалентных максимальных напряжений по Мизесу во внешних волокнах для 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 и 32 колец цилиндрической оболочки (рисунки 8-12). Также проведено сравнение с

величинами напряжений при расчете без учета стадийности (отмечено синим маркером слева на рисунках 8-12).

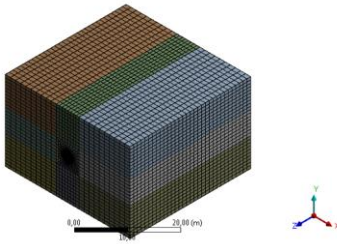


Рисунок 7. Общий вид расчетной модели

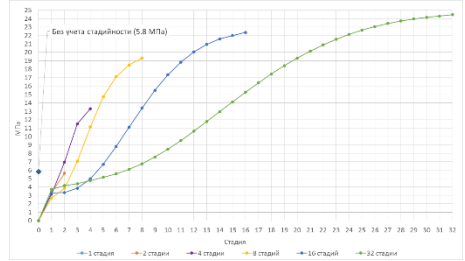


Рисунок 8. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 01 кольца

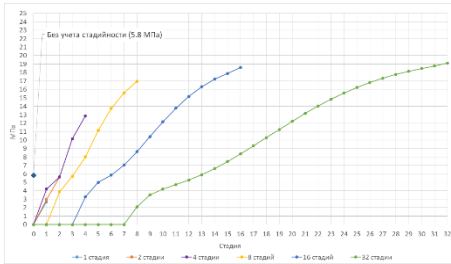


Рисунок 9. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 08 кольца

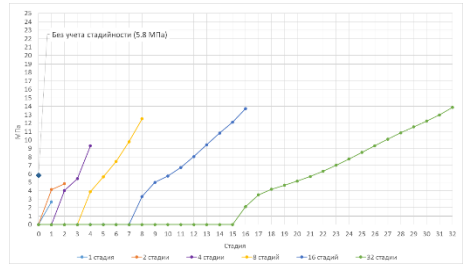


Рисунок 10. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 16 кольца

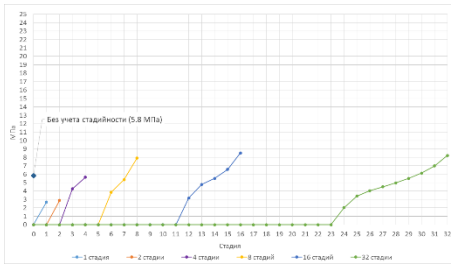


Рисунок 11. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 24 кольца

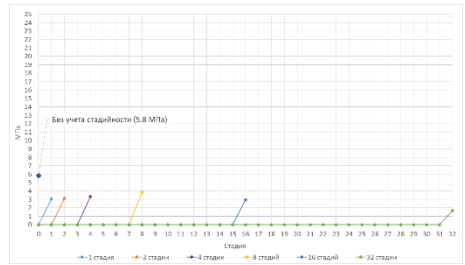


Рисунок 12. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 32 кольца

На основании полученных результатов сделан вывод, что величины максимальных напряжений в шести расчетных случаях с разным количеством стадий существенно разные. Отмечено, что после расчетного случая из 8 стадий следующие расчетные случаи с большим количеством стадий не приводят к существенным изменениям величин максимальных напряжений в диапазоне с 4 по 28 кольцо цилиндрической оболочки. Также отмечено, что напряжения в первом кольце оболочки существенно вырастают, а в последнем кольце, напротив, напряжения существенно падают, если сравнивать расчетный случай из 8 стадий с расчетными случаями из 16 и 32 стадиями.

Кроме этого, в каждом кольце цилиндрической оболочки, исключая последнее, в расчетных случаях с количеством стадий меньше 8 максимальные напряжения существенно занижены. Также в кольцах оболочки при малом количестве стадий действуют незначительные или совсем отсутствуют остаточные напряжения с предыдущих стадий расчета.

Сделан вывод, что учет коэффициента трения  $f$  значительно снижает величину максимальных напряжений. В среднем в каждом кольце оболочки напряжения снизились на 43 %.

Учет пластичности модели материала для оболочки заметно снижает величину максимальных напряжений. В среднем в каждом кольце оболочки напряжения снизились на 17 %. Также указано, что характер кривых напряжений отличен от характера кривых, полученных ранее.

Для примера на рисунках 13 и 14 показаны графики изменения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу во внешних волокнах 08 кольца оболочки сравниваемых моделей с учетом и без учета коэффициента трения  $f$  и пластичности материала оболочки соответственно. Дополнительно проведено сравнение с величинами напряжений при расчете без учета стадийности (отмечено синим маркером слева на рисунках 13-14).

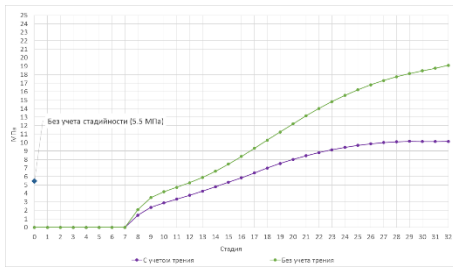


Рисунок 13. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 08 кольца с учетом и без учета коэффициента трения  $f$

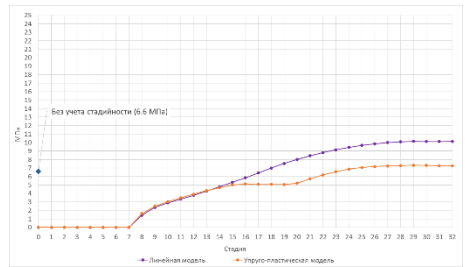


Рисунок 14. Кривые эквивалентных напряжений по Мизесу 08 кольца с учетом и без учета пластичности

Также в рамках данной главы разработана пространственная расчетная модель с двумя параллельно расположенными цилиндрическими оболочками и единым окружающим основанием (рисунки 15 и 16). Задача исследования: определить особенности НДС существующей цилиндрической оболочки и окружающего основания, обусловленные поэтапным возведением второй близлежащей оболочки. По полученным результатам установлено, что возведение второй оболочки оказывает незначительное влияние на уже существующую оболочку, кроме последнего кольца, где прирост напряжений составляет 116.8 %. В рассмотренных кольцах с 1 по 28 увеличение напряжений не превышает 7.8 %.

Сравнение с результатами, полученными в расчетах без учета стадийности для всех рассмотренных случаев, также показало необходимость учета изменений расчетной модели во времени при решении подобных задач.

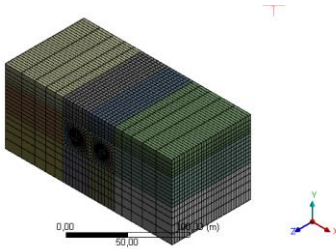


Рисунок 15. Общий вид расчетной модели

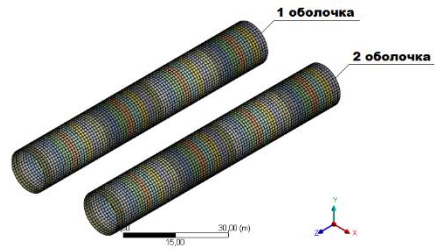


Рисунок 16. Вид цилиндрических оболочек

В пятой главе разработаны и реализованы методика и алгоритм определения критических нагрузок потери устойчивости равновесия цилиндрических оболочек, взаимодействующих с окружающим основанием. Проведен численный анализ системы «оболочка – основание» с целью определения критической нагрузки, при которой оболочка, взаимодействующая с окружающим основанием, теряет устойчивость равновесия. Определены формы потери устойчивости в линейной и геометрически нелинейной постановках задач с последующим сравнительным анализом результатов.

В целях верификации численной методики определения критических нагрузок рассмотрена задача о потере устойчивости равномерно сжатого кольца. Сопоставление полученных результатов с известным аналитическим решением показало хорошую точность МКЭ.

В главе приведены результаты определения и анализа критической нагрузки и форм потери устойчивости стержневой модели системы «оболочка – основание» в плоской постановке при различных условиях взаимодействия оболочки с окружающим основанием. Исследования проведены на базе конечно-элементного программного комплекса MSC PATRAN – NASTRAN.

Расчетные модели составлены из стержневых элементов оболочки и контактных элементов, имитирующих грунт, с коэффициентом постели упругого основания  $k = 100$  МПа/м. Диаметр оболочки составляет  $D = 5$  м, поперечное сечение принято прямоугольным  $1 \text{ м} \times 0.25 \text{ м}$ . Материал оболочки принят неограниченно линейно упругим. Физико-механические свойства оболочки соответствуют свойствам бетона: модуль упругости  $E_{об} = 3.0 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_{об} = 0.18$ , плотность  $\rho_{об} = 2300 \text{ кг/м}^3$ . Глубина заложения продольной оси оболочки составляет  $3.5D$ . Объемный вес основания принят  $\gamma = 1600 \text{ кг/м}^3$ .

Также в этой и всех последующих расчетных моделях присутствует горизонтальная возмущающая сила, приложенная к верхней точке оболочки. Данная сила вынуждает систему среагировать на кососимметричную форму потери устойчивости, по которой возможна потеря устойчивости расчетной модели при меньшей критической нагрузке.

В таблице 1 приведены значения критической нагрузки для трех выполненных расчетных случаев стержневой модели системы «оболочка – основание».



Критическая нагрузка определена как «запас устойчивости» по отношению к действующей нагрузке  $\gamma z_1$ , где  $z_1$  – расстояние от верха основания до верха оболочки.

Таблица 1

Вид анализа стержневой модели системы «оболочка – основание»	Величина критической нагрузки
Линейный (с двусторонними связями)	$235\gamma z_1$
Линейный (с односторонними связями)	$105\gamma z_1$
Нелинейный (с односторонними связями)	$69\gamma z_1$

В этой же главе выполнен численный анализ плоской системы «оболочка – основание» в программном комплексе MSC PATRAN – NASTRAN. Расчетная модель составлена из стержневых элементов оболочки, двумерных плоских четырехузловых элементов, имитирующих основание, и контактных элементов между оболочкой и основанием.

Геометрические и физико-механические параметры оболочки взяты из предыдущей стержневой модели системы. Расстояние от края оболочки до боковых торцов окружающего основания. принято равным  $L = 5D$ , где  $D$  – диаметр оболочки. Расстояние от края оболочки до верхней и нижней границ окружающего основания принято равным  $3D$ . Материал основания принят неограниченно линейно упругим. Физико-механические свойства окружающего основания приняты следующими: модуль деформации  $E_{cp} = 14$  МПа, коэффициент поперечной деформации  $\mu_{cp} = 0.3$ , плотность  $\rho_{cp} = 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

Ниже в таблице 2 приведены значения критической нагрузки для двух выполненных расчетов плоской модели системы «оболочка – основание».

Таблица 2

Вид анализа плоской модели системы «оболочка – основание»	Величина критической нагрузки
Линейный (с двусторонними связями)	$10.4\gamma z_1$
Нелинейный (с односторонними связями)	$23.4\gamma z_1$

Также в рамках данной главы рассмотрена пространственная модель системы «оболочка – основание» в случае бесконечно длинной цилиндрической оболочки. Расчетная модель составлена из двумерных плоских четырехузловых элементов оболочки и трехмерных тетраэдральных десятиузловых элементов окружающего основания.

Геометрические параметры приняты как в плоской модели системы. Материалы оболочки и основания заданы в двух вариантах: неограниченно линейно упругими и упруго-пластическими (с параметрами из предыдущих расчетов). Коэффициент трения между оболочкой и основанием  $f = 0.6$ . Расчеты проведены при различных условиях взаимодействия оболочки с окружающим основанием в программном комплексе ANSYS.

В таблице 3 приведены значения критической нагрузки для пяти выполненных расчетных случаев.

Таблица 3

Вид анализа пространственной модели системы «оболочка – основание» в случае бесконечно длинной цилиндрической оболочки	Величина критической нагрузки
Линейный расчет с двусторонними связями при линейно упругих моделях материалов	$35.1\gamma z_l$
Нелинейный расчет с односторонними связями без учета коэффициента трения при линейно упругих моделях материалов	$33.9\gamma z_l$
Нелинейный расчет с односторонними связями с учетом коэффициента трения при линейно упругих моделях материалов	$34.2\gamma z_l$
Нелинейный расчет с односторонними связями без учета коэффициента трения при упруго-пластических моделях материалов	$3.9\gamma z_l$
Нелинейный расчет с односторонними связями с учетом коэффициента трения при упруго-пластических моделях материалов	$4.4\gamma z_l$

Отмечено, что «запас устойчивости»  $4.4\gamma z_l$  по отношению к действующей нагрузке не является в полной мере достаточным для вводимых в эксплуатацию сооружений.

Также рассмотрена пространственная модель системы «оболочка – основание» с неоднородными физико-механическими свойствами основания вдоль продольной оси цилиндрической оболочки, показанная на рисунке 17.

Длина оболочки и массива составляет  $6D$ , остальные геометрические параметры взяты из предыдущей модели системы. Материал оболочки принят по модели Друкера – Прагера (с параметрами из предыдущих расчетов). Физико-механические свойства двух частей окружающего основания заданы по модели Мора – Кулона с параметрами, указанными в таблице 4. Коэффициент трения между оболочкой и основанием  $f = 0.6$ .

Таблица 4

№	Модуль деформации $E_{сп}$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\mu_{сп}$	Плотность $\rho_{сп}$ , кг/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , кПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , °
1	14	0.3	1600	10	20
2	16	0.3	1800	10	25

Расчет проведен с учетом и без учета коэффициента трения в контактной паре между оболочкой и окружающим основанием в программном комплексе ANSYS. На рисунке 18 показано поле перемещений цилиндрической оболочки при достижении критической нагрузки в случае учета коэффициента трения.

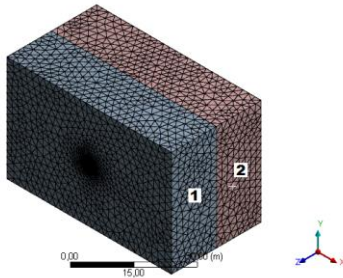


Рисунок 17. Общий вид пространственной расчетной модели

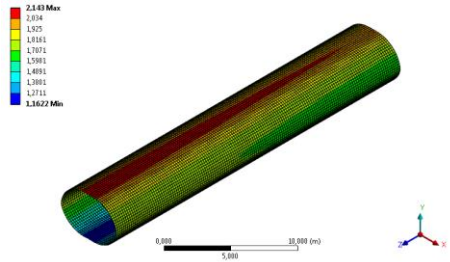


Рисунок 18. Поле полных перемещений цилиндрической оболочки

По результатам расчета сделан вывод, что потеря устойчивости оболочки происходит на участке более слабого основания. В таблице 5 приведены значения критической нагрузки для двух выполненных расчетных случаев.

Таблица 5

Вид анализа пространственной модели системы «оболочка – основание» с неоднородными физико-механическими свойствами основания	Величина критической нагрузки
Нелинейный расчет с односторонними связями без учета коэффициента трения при упруго-пластических моделях материалов	4.5γz <sub>l</sub>
Нелинейный расчет с односторонними связями с учетом коэффициента трения при упруго-пластических моделях материалов	4.6γz <sub>l</sub>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проведенных исследований, сформулируем следующие итоги.

1. Разработана численная методика учета строительного зазора между цилиндрической оболочкой и окружающим основанием, основанная на пространственных расчетных моделях с использованием двух способов создания зазора, позволяющих учитывать «потерянный объем» грунта от работы тоннелепроходческого механизированного комплекса. Расчетные модели сопоставлены между собой и с известным полуэмпирическим методом. Лучшие результаты показала модель с контактными элементами, аппроксимирующими зазор, в расчетах по определению осадки поверхности массива как в поперечном, так и в продольном направлениях к оси оболочки.

2. Определены размеры пространственного фрагмента массива, необходимые для получения достоверных результатов расчета осадки верхней поверхности в поперечном и продольном направлениях к оси оболочки по разработанным расчетным моделям, учитывающим зазор. С учетом полученных результатов расчетов НДС системы можно рекомендовать в практических расчетах по определению осадки поверхности массива в поперечном направлении к оси оболочки принимать расстояние  $L$  от края оболочки до боковых торцов массива (в поперечном направлении), удовлетворяющее условию  $L \geq 5D$ , где  $D$  – диаметр оболочки. При определении осадки поверхности массива в продольном направлении к оси оболочки можно рекомендовать принимать расстояние  $L$  от края оболочки до торцов массива (в продольном направлении), также удовлетворяющее условию  $L \geq 5D$ .

3. Разработана программа для автоматизации процесса создания твердотельной расчетной модели цилиндрической оболочки, окружающего массива и контактных элементов зазора на командном языке PCL, который служит частью системы MSC PATRAN.

4. Решена практическая задача по определению мульды оседания участка поверхности земли с эксплуатируемыми железнодорожными путями Московской железной дороги, расположенного в пределах зоны влияния строительства проектируемых перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена от станции метро «Раменки» до станции метро «Расказовка». Полученные результаты сопоставлены с данными геодезического мониторинга.

5. Разработана и реализована методика, основанная на пространственных расчетных моделях, изменяющихся во времени, позволяющих учесть разное количество этапов возведения цилиндрических оболочек, взаимодействующих с окружающим основанием. Модели учитывают одностороннее контактное взаимодействие, строительный зазор и физическую нелинейность материалов. Исследовано влияние учета поэтапного возведения конструкции на НДС цилиндрической оболочки конечных размеров, взаимодействующей с окружающим основанием, с использованием численных методов. Установлено, что величины внутренних усилий в теле цилиндрической оболочки сильно зависят от количества стадий в расчетном случае. Опираясь на полученные результаты, рекомендовано в практических расчетах принимать 8 и более расчетных стадий возведения оболочки.

6. Установлено, что учет коэффициента трения в стадийных расчетных случаях значительно снижает величину максимальных напряжений в цилиндрической оболочке. Показано, что введение в расчет упруго-пластической модели материала для оболочки также заметно снижает величину максимальных напряжений.

7. Определены особенности НДС системы, состоящей из двух параллельно расположенных цилиндрических оболочек и окружающего основания, а именно: определено влияние, оказываемое на первую оболочку поэтапным возведением второй близлежащей оболочки. Полученные результаты показали, что данное влияние является в целом незначительным и прирост напряжений для всех рассмотренных колец первой оболочки не превысил 7.8 %, кроме последнего кольца, где увеличение напряжений составило 116.8 %.

8. Разработаны и реализованы методика и алгоритм получения критических нагрузок и форм потери устойчивости цилиндрической оболочки при различных моделях материалов и условиях контактного взаимодействия с окружающим основанием. Составлены стержневые, плоские и пространственные модели системы «оболочка – основание». Пространственные расчетные схемы построены с учетом и без учета коэффициента трения между оболочкой и основанием, а также в рамках линейно упругой и упруго-пластической моделей материалов. Проведен численный анализ системы с целью определения критической нагрузки, при которой конструкция оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием, теряет устойчивость равновесия, и форм потери устойчивости в линейном и нелинейном расчетных случаях с последующим сравнительным анализом результатов.

9. Установлено, что в расчетах на устойчивость при больших перемещениях системы нелинейный расчет путем пошагового приложения нагрузки и итерационной процедуры позволяет отыскивать зоны отсутствия контакта элементов (область отлипания оболочки от основания) и определять изменяющееся во времени положение оболочки, что исключает завышенные значения критической нагрузки, полученные при линейном расчете, когда перемещения малые. Также определено, что учет коэффициента трения обеспечивает лучшую совместную работу оболочки и окружающего основания и позволяет получить несколько большие значения критической нагрузки, как при линейной упругой модели материала, так и при упруго-пластической.

10. Численным анализом пространственной системы «оболочка – основание» в случае неоднородных физико-механических свойств основания вдоль продольной оси цилиндрической оболочки установлено, что потеря устойчивости оболочки происходит на участке более слабого основания.

**Основное содержание диссертации опубликовано в 17 работах.**

*В рецензируемых научных изданиях:*

1. Косицын, С. Б. Численный анализ учета стадийности в расчетах оболочки совместно с массивом грунта / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2019. – Volume 15. – Issue 3. – Pp. 84 – 95.

2. Косицын, С. Б. Численный анализ напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, взаимодействующей с основанием, с учетом изменения расчетной модели во времени / С. Б. Косицын, В. С. Федоров, В. Ю. Акулич // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 3(55). – С. 84 – 93.

3. Косицын, С. Б. Определение критической нагрузки потери устойчивости стержневой и плоской моделей круговой цилиндрической оболочки, взаимодействующей с основанием / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – Обзорно-аналитический и научно-технический журнал. – 2019. – Т. 15. – № 4. – С. 291 – 298.

4. Косицын, С. Б. Об одном численном способе определения осадки поверхности грунтового массива, вызванной сооружением оболочки обделки тоннеля / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – Volume 14. – Issue 1. – Pp. 78 – 91.

5. Косицын, С. Б. Геотехнический прогноз влияния строительства проектируемого тоннеля метрополитена методом щитовой проходки на осадки земной поверхности / С. Б. Косицын, В. С. Федоров, В. Ю. Акулич // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 4(48). – С. 90 – 98.

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

6. Kosytsyn, S. Buckling load of an infinitely long cylindrical shell interacting with the soil environment / S. Kosytsyn, V. Akulich // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1425 (2020) 012078. – Pp. 1 – 9.

7. Kosytsyn, S. Stress-strain state of a cylindrical shell of a tunnel using construction stage analysis / S. Kosytsyn, V. Akulich // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. – 2019. – Volume 21. – Pp. 76 – 80.

8. Kositsyn, S. B. Numerical analysis of a cylindrical shell and soil considering changes in a computational model over time / S. B. Kositsyn, V. S. Fedorov, V. Yu. Akulich, V. I. Kolchunov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2019. – Issue 4(44). – Pp. 82 – 91.

9. Kositsyn, S. B. Geotechnical projection of the influence of the construction of the designed metropolitene tunnel by the method of shield passage on the sedimentation of the earth's surface / S. B. Kositsyn, V. S. Fedorov, V. Yu. Akulich // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2018. – Issue 1(37). – Pp. 81 – 91.

*В других изданиях:*

10. Акулич, В. Ю. Определение критической нагрузки цилиндрической оболочки, взаимодействующей с окружающим основанием / В. Ю. Акулич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки – 2020». «Наука МИИТа – транспорту» М.: МИИТ, 2020. – С. П-31.

11. Косицын, С. Б. О численных методах определения мульды оседания поверхности грунтового массива, вызванной сооружением оболочки тоннеля / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич // Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. – М.: Издательство АСВ, 2019. – С. 303 – 315.

12. Акулич, В. Ю. Построение пространственных твердотельных расчетных моделей с использованием языка PCL / В. Ю. Акулич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки – 2019». «Наука МИИТа – транспорту» М.: МИИТ, 2019. – С. II-3.

13. Косицын, С. Б. Численная методика определения осадок земной поверхности, связанных с воздействием тоннелепроходческого комплекса на грунтовый массив / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – М.: МАДИ, 2018. – № 2(16). – С. 21.

14. Косицын, С. Б. Геотехнический прогноз влияния строительства проектируемых тоннелей метрополитена методом щитовой проходки на осадки земной поверхности с использованием комплекса MSC PATRAN-NASTRAN / С. Б. Косицын, А. А. Зайцев, А. В. Замуховский, В. Ю. Акулич // Сб. науч. тр., посвящ. 70-летию П. А. Ляшенко. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – С. 62 – 67.

15. Косицын, С. Б. Численный способ проверки безопасности состояния инфраструктуры железнодорожного пути при глубинном пересечении перегонными тоннелями метрополитена / С. Б. Косицын, В. Ю. Акулич, А. А. Зайцев // Труды XV международной научно-технической конференции. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Москва 4 – 5 апреля. – М.: 2018. – С. 137 – 143.

16. Акулич, В. Ю. Напряженно-деформированное состояние цилиндрической оболочки тоннеля с учетом изменения расчетной модели во времени / В. Ю. Акулич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки – 2018». «Наука МИИТа – транспорту» М.: МИИТ, 2018. – С. II-80.

17. Акулич, В. Ю. Геотехнический прогноз влияния строительства проектируемых тоннелей метрополитена методом щитовой проходки на осадки земной поверхности с использованием комплекса MSC PATRAN-NASTRAN / В. Ю. Акулич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки – 2017». «Наука МИИТа – транспорту» М.: МИИТ, 2017. – С. II-1.

Акулич Владимир Юрьевич

**Напряженно-деформированное состояние и устойчивость равновесия цилиндрических оболочек при упругих и упруго-пластических деформациях, в том числе взаимодействующих с окружающим основанием, с учетом изменения расчетной модели во времени**

2.1.9. Строительная механика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать  
Объем 1.5 п.л.

Заказ №

Формат 60x90/16  
Тираж 80 экз.

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,  
ЦСО Отдел дизайна, верстки и печати РУТ (МИИТ)