

На правах рукописи



Ракитин Борис Андреевич

**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕЗНАПОРНЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

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

Челябинск  
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Строительные конструкции и инженерные сооружения».

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор  
**Максимов Юрий Васильевич.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Назаренко Павел Петрович,**

кандидат технических наук, доцент  
**Шматков Сергей Борисович.**

Ведущая организация – ОАО «Технологический институт  
«ВНИИжелезобетон» (г. Москва).

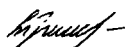
Защита состоится «7» июля 2010 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 при Национальном исследовательском Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Национального исследовательского Южно-Уральского государственного университета.

Отзывы на автореферат просим высылать в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, диссертационный совет ДМ 212.298.08, ученому секретарю Трофимову Б. Я.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор,  
советник РААСН



Б.Я. Трофимов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время в промышленном, гражданском и транспортном строительстве значительный удельный вес составляют подземные трубопроводы различного назначения. Практика показала, что одними из самых долговечных, надёжных и экономичных являются трубопроводы, изготавливаемые из железобетона.

В результате применения передовых технологий и конструктивных решений во всём мире широкое распространение получили безнапорные железобетонные трубы. Они используются в качестве водопропускных, канализационных, дренажных и ливнёвых для отвода атмосферных сточных вод.

Например, в Германии, использование материалов в канализационных системах следующее: бетон/железобетон – 46%, керамика – 40%, пластик – 6%, каменная кладка – 3%, фибробетон – 2%, чугун/сталь – 1%, другие – 1%.

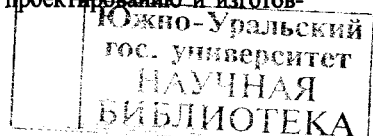
В нашей стране около 60% подземных трубопроводных коммуникаций уже исчерпали нормативный срок службы и около 30% городских безнапорных водоотводящих трубопроводов требуют срочного ремонта или замены. Для исправления сложившейся ситуации сегодня появились новые технологические решения, обеспечивающие производство безнапорных железобетонных труб, в том числе больших диаметров (более 1000 мм) и построены современные заводы для их изготовления. В то же время большинство нормативных документов и методик расчёта данного типа конструкций были разработаны в 60 – 80е годы прошлого века и не соответствуют современным требованиям.

Необходимость совершенствования конструктивно-технологических решений безнапорных железобетонных труб также возникла с введением в действие ГОСТ Р 52748–2007, по которому возросли величины нагрузок от транспортных средств (А–14, НК–100.8) на подземные трубопроводы, и появлением на промышленных предприятиях высокопроизводительного оборудования.

**Целью работы** является выявление особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) безнапорных железобетонных труб большого диаметра в зависимости от разных видов перемещающейся транспортной нагрузки.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие конструктивные решения железобетонных труб и методики их расчёта.
2. Разработать методику натуральных испытаний и выполнить экспериментальные исследования НДС безнапорных железобетонных труб большого диаметра, уложенных в траншее.
3. Исследовать возможность применения безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом для строительства подземных трубопроводов при воздействии транспортных нагрузок по ГОСТ Р 52748–2007 (А–14, НК–100.8).
4. Получить и сопоставить результаты экспериментальных и численных исследований. Предложить рекомендации по проектированию и изготовлению рассматриваемого типа конструкций.



5. В заводских условиях изготовить и применить при строительстве подземных трубопроводов в Челябинской области опытную партию безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом.

**Объектом исследования** являются безнапорные железобетонные трубы большого диаметра, армированные одинарным цилиндрическим каркасом.

**Предметом исследования** является НДС данного типа конструкций в зависимости от высоты засыпки грунтом трубопровода и воздействия различных видов транспортных нагрузок.

**Научная новизна работы:**

1. Для проведения комплексного исследования НДС железобетонных труб была разработана методика натурных испытаний, позволяющая учитывать воздействия на трубопровод различных видов перемещающейся транспортной нагрузки, в том числе соответствующих требованиям ГОСТ Р 52748–2007;

2. Получены экспериментальные данные об изменении НДС безнапорных железобетонных труб большого диаметра при воздействии перемещающейся временной нагрузки, которые показали изменение величины и смещение пика изгибающих моментов, возникающих в стенке трубопровода;

3. Оценена достоверность методов расчёта безнапорных железобетонных труб, армированных одинарным цилиндрическим каркасом, путём их сопоставления с результатами натурных испытаний и подтверждена целесообразность применения нелинейной упруго-пластической модели грунта Кулона-Мора для расчёта данного типа конструкций.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработаны рекомендации по проектированию и изготовлению безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом, для строительства подземных трубопроводов, обладающих требуемой прочностью и трещиностойкостью;

2. Внедрены в производство рациональные типы конструкций безнапорных железобетонных труб под увеличенную на 25% транспортную нагрузку и со сниженной на 18,9% себестоимостью изготовления по сравнению с трубами, выпускаемыми по ГОСТ 6482–88;

3. Результаты научных исследований использованы для разработки технологической карты на изготовление безнапорных железобетонных вибропресованных труб на ООО «ПКО «Челябинск-стройиндустрия».

**Внедрение результатов.** На основе результатов работы ООО «ПКО «Челябинск-стройиндустрия» в период с 2008 по 2010 гг. выпустило 540 безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом. Фактическая экономия составила 1 585 440 руб. Эти трубы были использованы строительными организациями, в том числе ООО «Уралгеострой» и ООО «АСКА», при строительстве инфраструктуры на следующих объектах: 13 микрорайон г. Челябинска, Копейское шоссе, перекрёсток проспекта Победы и улицы Татищева, Краснопольская площадка г. Челябинска,

ливневый коллектор от перекрёстка Комсомольский проспект – Новоградский проспект до перекрёстка ул. Академика Макеева – 250 лет Челябинску.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная методика испытаний подземных трубопроводов на воздействие различных типов транспортной нагрузки, в зависимости от её перемещения относительно оси трубопровода;
2. Новые экспериментальные данные о величине моментов, возникающих в стенке трубопровода в зависимости от расположения движущейся временной нагрузки;
3. Результаты оценки достоверности различных методов расчёта железобетонных труб на основании сопоставления с данными натурных испытаний.

**Достоверность полученных результатов и основывающихся на них выводах** обеспечивается физической корректностью моделей конструкций и грунта, построенных на основе конечных элементов и численных методов, заложенных в пакете конечно-элементных программ PLAXIS, а также сопоставлением результатов численных расчетов с результатами натурального эксперимента. Отклонения полученных результатов не превышают 5%.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на ежегодных научно-технических конференциях кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ (Челябинск, 04.2006, 04.2007, 04.2008, 04.2009), на всероссийской научно-практической конференции «Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения» (Казань, 15 – 16.05.2008), на первой и второй научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 20.04.2009, 14.04.2010), на международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития Евроазиатских транспортных систем» (Челябинск, 12 – 13.05.2009), на втором международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона» (Минск, 21 – 23.10.2009), на всероссийской конференции по геотехнике среди студентов, аспирантов и молодых учёных, проводимой Санкт-Петербургским государственным архитектурно-строительным университетом (Санкт-Петербург, 3 – 5 февраля 2010).

Технические разработки по внедрению безнапорных железобетонных труб в строительстве подземных трубопроводов были отмечены дипломами программы «100 лучших товаров России» (г. Москва) и «20 лучших товаров Челябинской области» (г. Челябинск).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах (2 в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК).

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций и 4-х приложений. Работа содержит 185 страниц текста, в том числе 62 рисунка, 28 таблиц и список литературы из 106 наименований, в том числе 18 из зарубежных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность рассматриваемой темы, приведена общая характеристика работы и её основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы приведён обзор современного состояния вопроса, конструктивных решений безнапорных железобетонных труб, различных технологий их производства. Рассмотрены различные методики учёта давления грунта при расчёте трубопроводов в траншеях, обобщены и проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований давления засыпки на трубопроводы, описаны различные случаи аварий трубопроводов с анализом их причин.

Основу методов определения нагрузок на подземные трубопроводы по результатам экспериментальных исследований заложили отечественные учёные: Давиденков Н.Н., Давыдов С.С., Дацко Н.Ф., Емельянов Л.М., Малышев М.В., Покровский Г.И., Фёдоров И.С., Сюдюков Г.М., Оспанов С.О. и др.

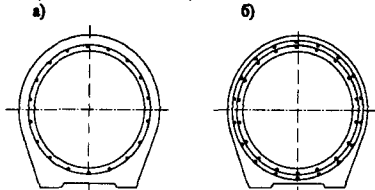
Среди зарубежных учёных большой вклад в этой области внесли: Терцаги К., Марстон А., Шлик В., Спенглер М. и др.

Работы Клейна Г.К., Снитко Н.К., Цытовича Н.А., Соколовского В.В., Терцаги К., Марстона А., Балсона Ф.С. и др. легли в основу создания теории определения давления на подземные сооружения.

В настоящее время, в связи с активным развитием производства сборного железобетона, в строительстве широкое распространение получили бетонные и железобетонные трубы круглого поперечного сечения, так как они являются наиболее технологичными для производства на заводах ЖБИ.

Анализ различных технологий производства железобетонных труб показал, что всё большее распространение получает метод вертикального вибропрессования с немедленной распалубкой изделия, благодаря его высокой производительности. Этим методом были изготовлены испытываемые трубы.

Безнапорные железобетонные трубы могут выпускаться с двумя типами арматурных каркасов (рис. 1): одинарным и двойным цилиндрическими каркасами. Одинарные каркасы применяются в круглых трубах со стенкой толщиной до 80 мм и диаметром 500 – 1000 мм, а двойные – в трубах с большей толщиной стенки и диаметром 1200 мм и более. Различают железобетонные трубы малых (100 – 500 мм), средних (600 – 1000 мм) и больших диаметров (более 1000 мм).



а – армирование одинарным цилиндрическим каркасом по ТУ 5862-060-01227131-2005\*

б – армирование двойным цилиндрическим каркасом по ГОСТ 6482-88

Рис. 1. Схемы армирования поперечных сечений железобетонных труб

Анализ состояния вопроса показал, что основную сложность при расчёте подземных трубопроводов составляет определение нагрузок от давления грунта засыпки и от транспортных средств. В связи с недостатком экспериментальных

данных о испытаниях железобетонных труб, уложенных в траншее, затруднена разработка методики расчёта данного типа конструкций и совершенствование их армирования. Поэтому для оценки возможности применения одинарного цилиндрического каркаса для армирования безнапорных железобетонных труб большого диаметра необходимо провести исследования НДС и несущей способности данного типа конструкций.

В конце главы сформулированы цель работы и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена методике проведения натурных испытаний, целью которых было исследование НДС безнапорных железобетонных труб, уложенных в траншее.

Особенность данных испытаний, в отличие от испытаний по ГОСТ 6482–88, состоит в определении изменения НДС трубопровода в зависимости от высоты засыпки грунтом и перемещении относительно оси трубопровода различных видов транспортной нагрузки.

Натурный эксперимент был проведён на 2 опытных образцах железобетонных труб (рис. 2), внутренним диаметром 1400 мм и полезной длиной 2,5 м, которые армировались одинарным пространственным цилиндрическим каркасом (см. рис. 1а), в отличие от армирования двойным по ГОСТ 6482–88 (см. рис. 1б) и являлись частью трубопровода общей протяжённостью 55 метров.

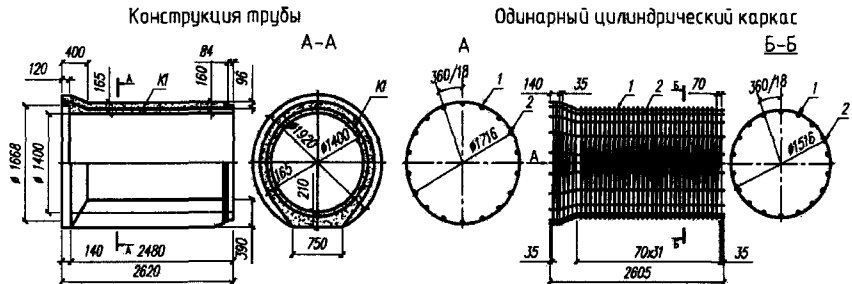


Рис. 2. Испытываемая конструкция безнапорной железобетонной трубы большого диаметра, армированная одинарным цилиндрическим каркасом

Опытные безнапорные железобетонные трубы марки ТСП 140.25–1 (табл. 1) изготавливались методом вертикального вибропрессования из жёсткой мелкозернистой бетонной смеси класса по прочности на сжатие В30 и армировались спиральной (рабочей) арматурой из проволоки  $\varnothing 6$  мм класса В500С, в качестве продольной (распределительной) арматуры использовались стержни из катанки В–6.5 СтЗпс–УО1.

При расчёте конструкций труб сбор нагрузок был выполнен по СН 00075 «Инструкция по определению нагрузок на подземные трубопроводы», затем определялась величина изгибающих моментов в стенке трубы:

$$M = 0,318 P_{\text{экв}} r, \quad (1)$$

где  $P_{\text{экв}}$  – эквивалентная нагрузка и  $r$  – средний радиус трубы.

Далее был выполнен расчёт железобетонной трубы на прочность и трещиностойкость согласно СП 52–101–2003.

**Армирование безнапорных железобетонных труб одинарным цилиндрическим каркасом по ТУ 5862-060-01227131-2005\***

№ п/п	Марка трубы по ГОСТ 6482-88	Высота засыпки грунтом, м	Толщина стенки, мм	Спиральное армирование	Продольное армирование
1	ТСП 120.25-1	2	135	Ø6 мм В500С, шаг 90 мм	18 Ø6.5 мм кантака
2	ТСП 120.25-2	4	135	Ø6 мм В500С, шаг 45 мм	
3	ТСП 120.25-3	6	135	Ø8 мм В500С, шаг 55 мм	
4	ТСП 140.25-1	2	165	Ø6 мм В500С, шаг 70 мм	
5	ТСП 140.25-2	4	165	Ø6 мм В500С, шаг 40 мм	
6	ТСП 140.25-3	6	165	Ø8 мм В500С, шаг 50 мм	

При проведении натурных испытаний для определения деформаций использовалась микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01, к которой подключалось 128 тензодатчиков. По замеренным деформациям вычислялись напряжения в поперечном сечении трубопровода, предполагая, что железобетонная труба работает в упругой стадии.

Для регистрации перемещения стенок труб внутри трубы устанавливалась крестовина для крепления индикаторов часового типа (рис. 3).

Для измерения осадки трубопровода от транспортных средств в подстилающее основание, использовалась система, состоящая из балки на двух опорах и индикатора часового типа.

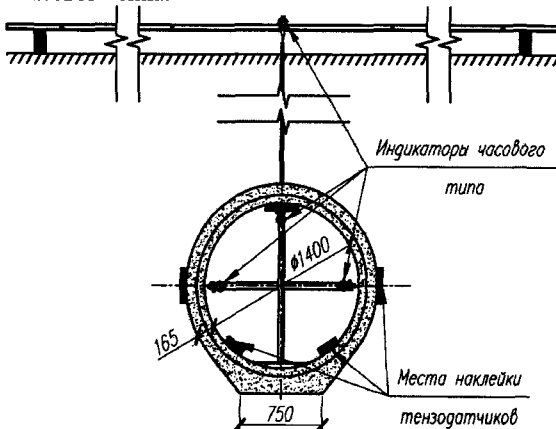


Рис. 3. Схема установки измерительного оборудования в поперечном сечении трубопровода

Эксперимент проводился при двух различных глубинах заложения трубопровода (рис. 4):

- Высота засыпки грунтом 1 м;
- Высота засыпки грунтом 2 м (с насыпью из крупнообломочного гравийного грунта плотностью  $2,1 \text{ т/м}^3$ ).



Основание под трубой – грунтовое плоское, засыпка – грунтом плотностью  $1,8 \text{ т/м}^3$  с нормальным уплотнением, в соответствии с ГОСТ 6482–88.

Временная нагрузка задавалась 3 видами транспортных средств, которые проезжали трубопровод перпендикулярно его оси: легковым автомобилем TOYOTA COROLLA (полная масса 1 650 кг); самосвалом КамАЗ 65115 (полная масса 25 200 кг); карьерным самосвалом БелАЗ 7547 (полная масса 85 000 кг).

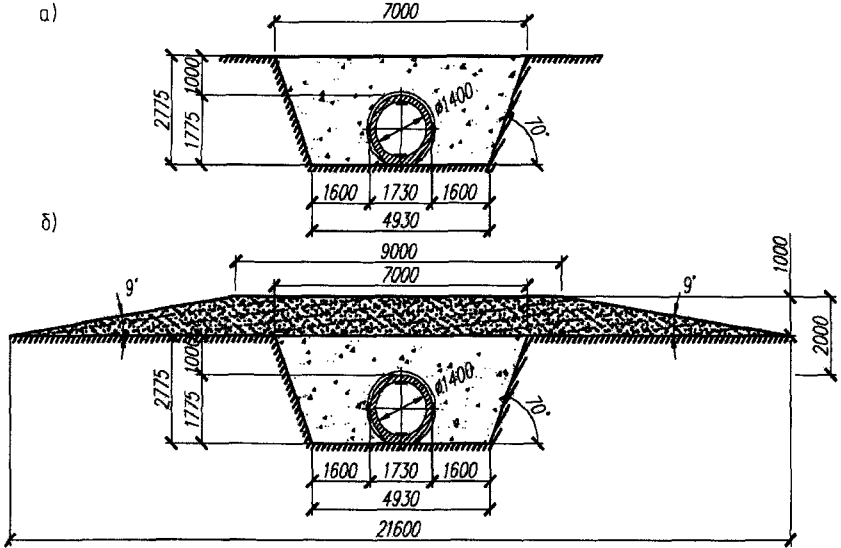


Рис. 4. Поперечный профиль траншеи:

а) высота засыпки грунтом 1 м, б) высота засыпки грунтом 2 м (с насыпью)

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований НДС безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом. Данный тип конструкций был испытан двумя способами: 1) по ГОСТ 6482–88 «Трубы железобетонные. Технические условия»; 2) натурные испытания труб, уложенных в траншее, по авторской методике.

Испытания труб по ГОСТ 6482–88 (рис. 5) были выполнены в отделе прочностных испытаний Испытательного центра ФГУП ГРЦ «КБ им. академика В.П. Макеева» в городе Миасс Челябинской области. Трубы были испытаны на прочность, трещиностойкость и водонепроницаемость.

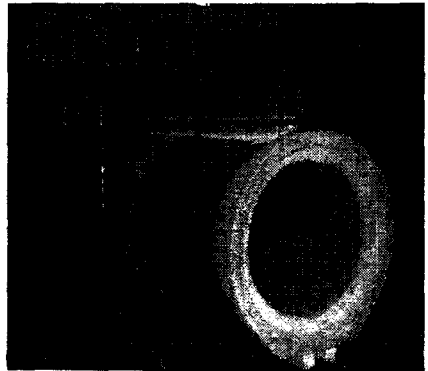


Рис. 5. Испытания безнапорной железобетонной трубы по ГОСТ 6482–88

Во время проведения натурального эксперимента транспортное средство перемещалось перпендикулярно оси трубопровода, отсчёты снимались на 11 остановках (этапах), расстояние между которыми равнялось 1 м (рис. 6).

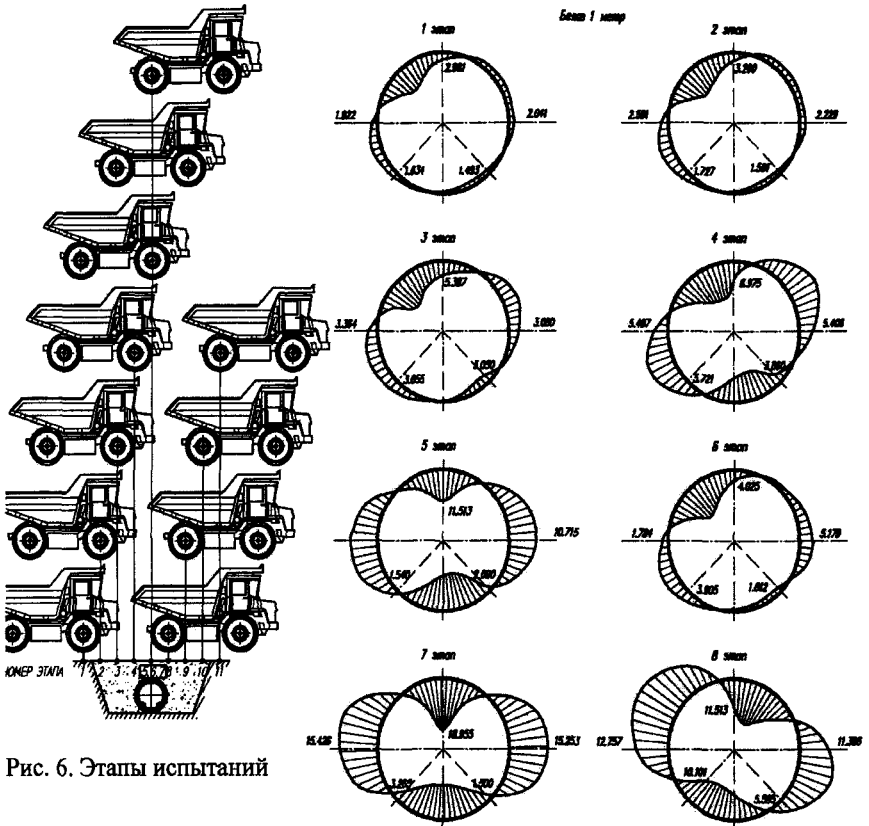
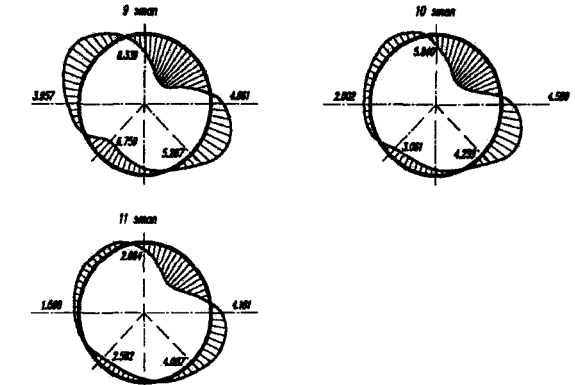


Рис. 7 Эпюры изгибающих моментов (кНм), возникающих в поперечном сечении трубопровода, при испытаниях карьерным самосвалом БелАЗ (полная масса 85 000 кг) при высоте засыпки грунтом 1 м



На рис. 7 представлены эпюры изгибающих моментов, возникающих в поперечном сечении трубопровода, полученные по результатам вычислений напряжений в наружных фибрах бетона с использованием микропроцессорной многоканальной тензометрической системы ММТС-64.01, при испытаниях карьерным самосвалом БелАЗ 7547 и высоте засыпки грунтом 1 м.

Опыты показали, что перемещение транспортных средств приводит к перемещению зон максимальных изгибающих моментов  $M_{\max}$  по поперечному сечению трубы, что отражено на рис. 7. Наибольшая величина изгибающего момента возникает на 7 этапе испытаний, когда задняя ось транспортного средства совпадает с осью трубопровода.

По результатам натурных испытаний были получены зависимости деформирования поперечного сечения железобетонных труб от воздействия различных видов транспортной нагрузки (рис. 8).

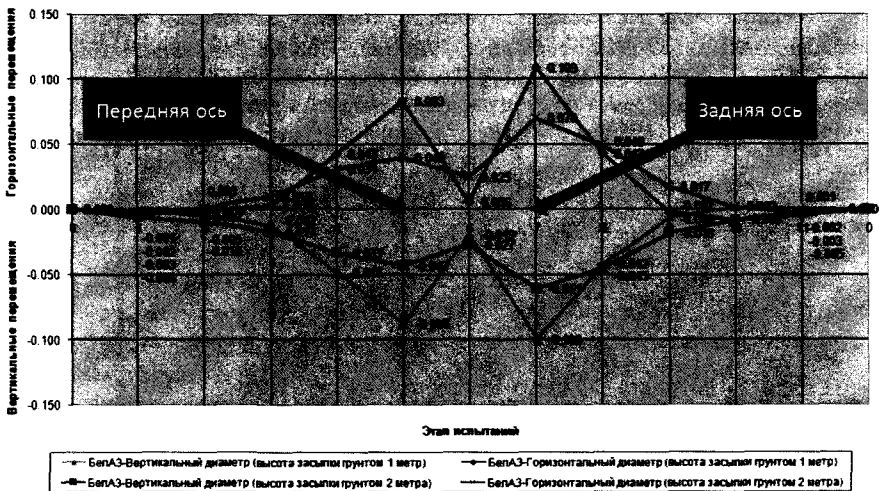


Рис. 8. Вертикальные и горизонтальные перемещения стенок труб при испытаниях БелАЗом (нагрузка на переднюю ось 28,340 тс, на заднюю 56,670 тс), мм

**Четвёртая глава** диссертации посвящена численным исследованиям НДС железобетонных труб большого диаметра.

Программа исследований включала проведение расчётов железобетонных труб методом конечных элементов, с целью разработки рекомендаций по их проектированию и изготовлению.

Для оценки влияния транспортной нагрузки и высоты засыпки грунтом на НДС трубопровода были выполнены статические расчёты труб с использованием пакета конечно-элементных программ PLAXIS 2D Version 9, предназначенного для двумерного расчёта деформаций и устойчивости сооружений.

При численном моделировании массива грунта задавались его физико-механические параметры, полученные в лаборатории «Механика грунтов» ЮУрГУ по результатам испытаний проб грунта, отобранных с места проведения натурных испытаний.

Всего было создано 2 расчётные схемы для трёх видов транспортных средств, с 66 вариантами загрузений. Грунтовый массив моделировался из 5699 пятнадцатизловых треугольных конечных элементов. Расчёты двухмерной модели были выполнены в нелинейной постановке с использованием упруго-пластической модели грунта Кулона-Мора (рис. 9).

Анализ полученных данных подтвердил, что изменение местоположения транспортной нагрузки относительно оси трубопровода приводит к возникновению различных по величине усилий в поперечном сечении трубопровода. С увеличением глубины заложения трубопровода влияние давления от грунтовой засыпки увеличивается, а от транспортных средств – уменьшается из-за эффекта рассеивания. По мере приближения транспортного средства к трубопроводу, прослеживается общая тенденция к увеличению величин изгибающих моментов, возникающих в поперечном сечении трубопровода, которая уменьшается с увеличением высоты засыпки грунтом.

Наибольшие деформации массива грунта наблюдались под задней осью транспортного средства. Деформации грунтового массива при испытании самосвалом БелАЗ при высоте засыпки грунтом 2 м показаны на рис. 9.

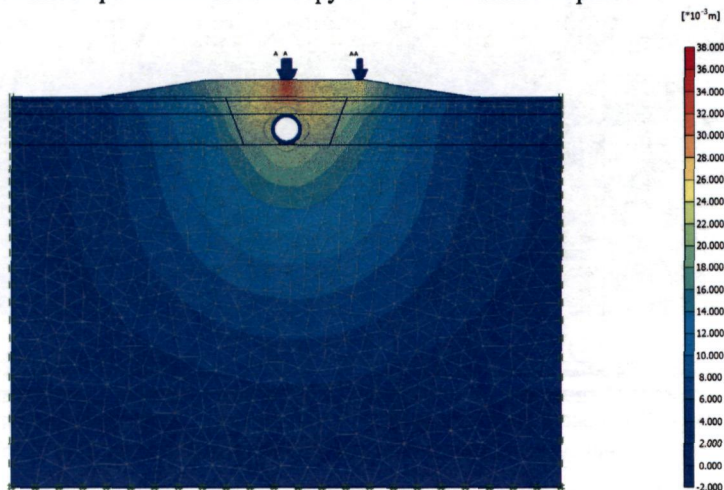


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние окружающего массива грунта при испытании железобетонных труб карьерным самосвалом БелАЗ 7547 (полная масса 85 000 кг) при высоте засыпки грунтом 2 м

По результатам сравнения величин максимальных изгибающих моментов, возникающих в поперечном сечении трубопровода (табл. 2) при натурных испытаниях с расчетными значениями и полученными в пакете конечно-элементных программ PLAXIS 2D, можно сделать вывод, что программа PLAXIS 2D дает заниженную величину максимального изгибающего момента в пределах от 0 до 5%. Величины максимальных изгибающих моментов, вычисленных по инструкции СН 00075, превосходят значения моментов, полученных по результатам натурных испытаний на 15 – 36%.

Сравнение величин максимальных изгибающих моментов, кНм

Метод определения $M_{\max}$	Карьерный самосвал БелАЗ 7547 (полная масса 85 000 кг)		Грузовой автомобиль КамАЗ 65115 (полная масса 25 200 кг)		Легковой автомобиль TOYOTA COROLLA (полная масса 1 650 кг)	
	Высота засыпки грунтом					
	1 м	2 м	1 м	2 м	1 м	2 м
Натурные испытания	18.955	12.998	7.934	8.965	1.915	5.119
PLAXIS 2D	18.197 (-4%)	12.648 (-1%)	7.537 (-5%)	8.687 (-3%)	1.842 (-4%)	5.119 (0%)
Инструкция СН 00075	21.798 (+15%)	16.248 (+25%)	9.630 (+21%)	11.565 (+29%)	2.432 (+27%)	6.962 (+36%)

На основании проведенных исследований были разработаны рекомендации по проектированию и изготовлению железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом для строительства подземных трубопроводов.

В заключительной пятой главе приводятся результаты математической обработки экспериментальных данных для получения регрессионных зависимостей (табл. 3) максимальных величин изгибающих моментов, возникающих в стенке трубопровода при высоте засыпки грунтом  $H$  от 1 до 2 м и расстоянии от центра транспортного средства до оси трубопровода  $L$  от 0 до 6 м при различных видах транспортной нагрузки. Обработка результатов проводилась в программе Statistica.

В качестве отклика для состава каждой строки плана в трёх опытах фиксировалась величина максимального изгибающего момента, возникающего в стенке трубопровода. Натурные испытания безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом, проводились по методике, разработанной автором во 2 главе диссертации.

Таблица 3

Расчёт величины максимального изгибающего момента  $M_{\max}$ , возникающего в стенке трубопровода

Транспортное средство	Уравнение регрессии для определения $M_{\max}$ , кНм
Легковой автомобиль	$M_{\max} = -0,732 - 0,004L^2 + 3,363H - 0,007H^2$ (2)
Самосвал КамАЗ	$M_{\max} = 4,926 + 0,073L - 0,149L^2 + 2,494H - 0,004H^2$ (3)
Карьерный самосвал БелАЗ	$M_{\max} = 15,139 + 0,128L - 0,376L^2 - 0,288H - 0,011H^2$ (4)

Сопоставляя результаты, полученные, например, на 7 этапе при испытаниях БелАЗом и высоте засыпки грунтом 2 м, получаем:

$$M_{\max, \text{расч.}} = 13,130 \text{ кНм} \quad \text{и} \quad M_{\max, \text{экс.}} = 12,998 \text{ кНм}$$

Проверка гипотезы адекватности регрессионных уравнений по критерию Фишера показала, что полученные модели адекватны, так как  $F_3 < F_r$ . Расхождение с результатами натуральных испытаний составляли от 1% до 3,4%.

Вариации основных параметров в случае численного моделирования с использованием МКЭ или расчёт по существующим методикам расчёта трудоёмки и занимают много времени. Расчёт по регрессионным зависимостям даёт возможность быстро в первом приближении оценить значения расчётных параметров и при необходимости провести их оптимизацию.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Разработана методика проведения натуральных испытаний, позволяющая выполнять комплексное исследование изменения НДС безнапорных железобетонных труб от воздействия временной нагрузки, отличающаяся возможностью проводить испытания при перемещении транспортной нагрузки относительно оси трубопровода.

2. Выявлена особенность формирования НДС подземного трубопровода, заключающаяся в том, что при боковом расположении временной нагрузки от транспортных средств, когда горизонтальное давление на трубопровод преобладает над вертикальным, происходит перемещение зон наибольших усилий и смена знака изгибающих моментов, возникающих в стенке трубопровода.

3. На основе анализа данных натурального эксперимента получены уравнения регрессии и построены трёхмерные диаграммы, которые позволяют быстро и с достаточной достоверностью определить величину максимального изгибающего момента, возникающего в стенке трубопровода, в зависимости от различных сочетаний приложенных к нему нагрузок.

4. Разработаны рекомендации по проектированию и изготовлению безнапорных железобетонных труб большого диаметра, армированных одинарным цилиндрическим каркасом для строительства подземных трубопроводов, включающие: методику расчёта конструкций по предельным состояниям первой и второй групп, предложения по определению основных конструктивно-технологических параметров труб и технологии их изготовления.

5. С использованием пакета конечно-элементных программ PLAXIS 2D исследовано сопротивление силовым воздействиям безнапорных железобетонных труб диаметром 1400 мм на стадии монтажа трубопровода и его эксплуатации под транспортные нагрузки, в том числе соответствующие ГОСТ Р 52748–2007. Выполненные многовариантные численные исследования подтвердили высокую эффективность применения одинарного армирования для безнапорных железобетонных труб из бетона класса по прочности на сжатие В30 при разной высоте засыпки и дают расхождение с экспериментальными до 5%.

6. Осуществлена реализация результатов работы на ООО «ПКО «Челябинск-стройиндустрия» и было получено, что изготовление труб с одинарным армированием и утолщённой стенкой позволяет более эффективно использовать работу бетона и снизить расход металла на 49% при увеличении расхода бетона на 15% по сравнению с типовыми трубами по ГОСТ 6482–88, армированными двойным каркасом. Экономия на разнице стоимости материалов составляет 5,51%, а общая экономическая эффективность, по сравнению с трубами с двойным армированием, составляет 18,9%.

**Основные положения работы опубликованы** в 7 научных трудах, из которых №1 и 2 включены в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий для обязательной публикации материалов докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ

1. Ракитин, Б.А. Исследование напряженно-деформированного состояния безнапорных железобетонных труб с учётом свойств массива грунта /Б.А. Ракитин, Б.В. Соловьев// *Строительная механика и расчёт сооружений*. – М.: НИЦ «Строительство», 2008.–№1. – С. 17–22.

2. Ракитин, Б.А. Проектирование и лабораторные испытания безнапорных железобетонных труб малого диаметра /Б.А. Ракитин, Б.В. Соловьев// *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Строительство и архитектура*. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – №6. – С. 25 –29.

3. Ракитин, Б.А. Применение железобетонных труб, изготавливаемых методом вертикального вибропрессования, при строительстве и реконструкции автомобильных дорог /Б.А. Ракитин, Ю.В. Максимов// *Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции «Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения»*. – Казань. КГА-СУ, 2008. – С. 325–331.

4. Ракитин, Б.А. Применение безнапорных железобетонных труб в транспортном строительстве /Б.А. Ракитин, Ю.Р. Карликанов// *Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития евроазиатских транспортных систем»*. – Челябинск, 2009. – С. 206 –209.

5. Ракитин, Б.А. Исследование и анализ напряжённо-деформированного состояния безнапорных железобетонных труб и совершенствование методик их расчёта /Б.А. Ракитин// *Научный поиск: материалы научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки*. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – С.105 –108.

6. Ракитин, Б.А. Оценка влияния окружающего массива грунта на напряжённо-деформированное состояние железобетонных трубопроводов /Б.А. Ракитин, Ю.В. Максимов// *Сборник научных трудов второго международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона»*. – Минск: Минсктипроект, 2009. – С. 259 – 266.

7. Ракитин, Б.А. Результаты натурных испытаний безнапорных железобетонных труб, уложенных в траншею /Б.А. Ракитин// *Научный поиск: материалы второй научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки*. – Челябинск: ЮУрГУ, 2010.

---

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 18.05.2010. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 0,7 Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 120 экз. Заказ 174/366.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.