

На правах рукописи



Пермикин Анатолий Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И
КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ ГРУНТОЗАСЫПНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ
СООРУЖЕНИЙ ИЗ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА**

Специальность 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: **Овчинников Илья Игоревич**,
и.о. зав. базовой кафедрой АО «Мостострой-11»
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук (2.1.9
Строительная механика), Советник РААСН,
доцент

Официальные
оппоненты: **Яшнов Андрей Николаевич**,
заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и
метрополитены», доктор технических наук,
профессор ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет путей сообщения»

Валиев Шерали Назаралиевич,
Заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и
строительные конструкции», кандидат
технических наук, доцент, «Московского
автомобильно-дорожного государственного
технического университета (МАДИ)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Дальневосточный
государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО «ДВГУПС»)

Защита состоится «25» декабря 2026 года в 12-00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского
государственного технического университета, по адресу: 394006 г. Воронеж,
ул. 20-летия Октября, д. 84, корпус 2, ауд. 2228.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского
государственного технического университета и на сайте ВГТУ <http://cchgeu.ru/>.

Автореферат разослан «23» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



С.В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемы правильного и актуального сбора внешних подвижных сосредоточенных нагрузок, значительно меняющихся по толщине грунта в связи с их распределением по всему объему в трехмерной постановке, а также возможность совместной работы сталефибробетонных грунтозасыпных арочных конструкций с грунтом обратной засыпки (грунтом-матрицей) посредством коэффициента Пуассона являются одними из важнейших тем в современных исследованиях механики грунтов и проектировании мостов.

Применение сталефибробетона обусловлено прежде всего рядом его физико-механических характеристик, значительно превосходящих характеристики традиционно применяемых материалов, таких как: бутовый бетон, железобетон, армированный стержневой арматурой классов АIII или А500, стальные двутавровые балки, МГК и т.п.).

Наиболее значительными физико-механическим характеристикам сталефибробетона, при его применении при изготовлении несущих арочных конструкций грунтозасыпных искусственных сооружений и водопропускных труб являются:

- малый собственный вес несущих конструктивных элементов, отраженный в патентных решениях автора:
 - RU 2 638 218 C1 «Грунтозасыпной мост»;
 - RU 2 610 955 C2 «Водопропускное устройство»;
- повышенные эксплуатационные характеристики, такие как морозостойкость – F_1 , а также морозостойкость в солях – F_2 , за счет уменьшения воздухововлечения и изменения качественной и количественной поровой структуры бетона-заполнителя, введением металлической фибры, что позволяет использовать сталефибробетонные конструкции в сложных коррозионных условиях;
- технологичность строительного производства и менее затратные методы и способы выполнения обратной засыпки с минимальным применением «ручного труда» с его полной заменой автоматизированным и роботизированным комплексом работ, за счет повышенной ударной прочности и жесткости сечений сталефибробетонных конструкций.

Используя данные полученные автором в статьях на тему: «Применение электромагнитного поля для ориентации металлической фибры в бетоне» и патенты: RU 2 451 647 C1 «Способ ориентации металлических дисперсно-армированных элементов в бетоне», RU 2 610 955 C2 «Водопропускное устройство», RU 2 638 218 C1 «Грунтозасыпной мост», RU 2 830 214 C1 «Опорный узел арочного моста», возможно строительство опытной модели моста, что позволит разработать технологию промышленного изготовления типовых звеньев труб под насыпями автомобильных и железных дорог, а также

типовых элементов арочных конструкций грунтозасыпных искусственных сооружений на авто и железных дорогах Российской Федерации.

Перспективное использование сталефибробетонных арочных конструкций в качестве несущих элементов грунтозасыпных искусственных сооружений в будущем позволит:

- перекрывать пролетами реки шириной до 50 – 70 метров используя один пролет;
- выполнять развязки в разных уровнях используя не только пространство над пересекаемой дорогой, но и под ней;
- возводить тоннельную обделку в условиях городской застройки открытым способом с использованием типовых арочных конструкций;
- применять зонтичные камнезащитные сталефибробетонные конструкции на склонах, за счет повышенной ударопрочности сталефибробетона.

Более широкому применению сталефибробетонных сборных и монолитных несущих конструкций грунтозасыпных транспортных сооружений и труб под насыпями автомобильных и железных дорог препятствуют следующие факторы:

- отсутствие стандартизированных схем учета временных нагрузок от автомобильного транспорта, схема с заменой временной нагрузки «эквивалентным слоем грунта» не актуальна и дает завышенные и зачастую неправильные усилия в элементах;
- отсутствие стандартизированных расчетных схем, учитывающих совместную работу, конструкция – грунт, значительно снижающую усилия, возникающие в элементах.

И даже применение громоздких конечноэлементных моделей не может дать исчерпывающий и верный ответ, ввиду огромного разнообразия как методов расчет, так и самих конечных элементов, описывающих грунт. Получение конечного результата полностью зависит от уровня инженера проектировщика и зачастую проверить конечный результат расчета вообще невозможно. Данная проблема возникает в связи с полным отсутствием нормативной базы, регламентирующей построение конечноэлементных моделей.

На сегодняшний день в нормативной базе Российской Федерации всего один нормативный документ регламентирует проектирование и конструирование мостов и труб – СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5). В СП не описано ни одного конечного элемента и не приведено ни одной расчетной схемы применимой к конечноэлементной модели, что делает все расчеты в конечноэлементных программах индивидуальными, что приводит к их огромному разнообразию и не позволяет создать единую базу проверенных и качественных конечноэлементных расчетов.

Единственным автором в РФ, кто пытается создать стандарт расчетов балочных мостов в ПК «Лира САПР» является Козлов Алексей Владимирович,

его методические указания и научные статьи могли бы стать прототипом нормативного документа, регламентирующего единый и общий подход к созданию свода правил для стандартизации расчетов балочных мостов в конечноэлементной постановке.

Цель диссертационной работы – создание теории расчета совместной работы грунтозасыпных сталефобробетонных арочных конструкций с грунтом обратной засыпки от временных подвижных нагрузок АК и НК, учитывающей распределение напряжений в грунте в пространственной постановке.

Для выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ физико-механических характеристик сталефибробетона и их применимости в мостостроении, а также в заглубленных сооружениях.
2. Сбор внешних нагрузок, как от веса обратной засыпки, так и временных подвижных нагрузок и их воздействие на заглубленные сооружения и грунтозасыпные мосты, а также стандартизация существующих методик расчета водопропускных труб и грунтозасыпных мостов.
3. Разработка готовой к практическому применению методики расчета грунтозасыпных сталефибробетонных мостов.
4. Разработка готовой к практическому применению теории определения напряжений в грунте обратной засыпки от подвижных нагрузок, представленных двухостными и четырехостными тележками А14 и Н14.
5. Разработка и конструирование новых форм:
 - грунтозасыпного сборного арочного мостового сооружения;
 - водопропускного сооружения кругового очертания из сборных блоков;
 - унифицированного фундамента для распорных грунтозасыпных сооружений.

Научная новизна работы

1. Разработана готовая к практическому применению методика расчета грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова.
2. Разработана готовая к практическому применению теория определения напряжений в грунте обратной засыпки от подвижных нагрузок АК и НК при расчете грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе задачи Буссинеска с учетом совместной работы грунт – мост.

Степень достоверности. Основные гипотезы, выдвинутые в диссертационном исследовании основаны на строгих математических моделях, таких как задача определения напряжений от действия сосредоточенной силы на линейно-деформируемое полупространство – Задача Буссинеска и полубезмоментная теория оболочек В.З. Власова. Также было выполнено сравнение всех результатов выдвинутых гипотез с результатами натурных испытаний.

Практическая значимость работы.

Разработаны и запатентованы:

1. метод улучшения свойств сталефибробетона в тонкостенных конструкциях ориентацией фибр магнитным полем (RU 2 451 647 C1 «Способ

ориентации металлических дисперсно-армированных элементов в бетоне»);

2. конструкция водопропускной трубы из сборных сталефибробетонных блоков (RU 2 610 955 C2 «Водопропускное устройство»);

3. конструкция грунтозасыпного сталефибробетонного моста из сборных блоков (RU 2 638 218 C1 «Грунтозасыпной мост»);

4. конструкция фундамента для грунтозасыпных мостов (RU 2 830 449 C1 «Монолитный фундамент»).

Теория определения напряжений в грунте обратной засыпки от подвижных нагрузок АК и НК при расчете грунтозасыпных ИССО, а также методика расчета грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова входят в учебный план на кафедре «Мосты и транспортные тоннели» УрГУПС, а также приняты к использованию в проектных мостовых организациях УрФО, таких как ООО «Дорстандартпроект». Конструкция сборной водопропускной трубы, шарнирные опорные узлы и фундаменты для грунтозасыпных конструкций работающие на горизонтальное усилие представлены в мостостроительной организации ООО «Бридж», и в других ведущих строительных организациях Уральского Федерального округа.

К защите представлены:

1. Выводы по результатам анализа существующих методов сбора нагрузок от автомобильного транспорта на водопропускные трубы и грунтозасыпные конструкции, а также существующих методик расчета водопропускных труб по Российским и зарубежным нормам.
2. Методика улучшения свойств сталефибробетона ориентацией фибр магнитным полем.
3. Теоретическая методика расчета сталефибробетонных грунтозасыпных мостов совместно с грунтом обратной засыпки, базирующаяся на применении теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова.
4. Методика определения напряжений в грунте обратной засыпки от подвижных нагрузок АК и НК при расчете грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе задачи Буссинеска.
5. Запатентованные конструкции грунтозасыпного моста, водопропускной трубы, фундамента грунтозасыпного моста.

Соответствие паспорту научной специальности 2.1.8.:

- п. 2 – разработка конструкций и методов строительства водопропускной трубы из сборных сталефибробетонных блоков (RU 2 610 955 C2), грунтозасыпного сталефибробетонного моста из сборных блоков (RU 2 638 218 C1), фундамента для грунтозасыпных мостов (RU 2 830 449 C1).
- п. 6 – разработка методики расчета грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова и разработка теории определения напряжений в грунте обратной засыпки от подвижных нагрузок АК и НК при расчете грунтозасыпных сталефибробетонных мостов на основе

задачи Буссинеска с учетом совместной работы грунт – мост.

- п. 8 – вопросы применения сталефибробетона для изготовления малых ИССО, а также вопросы воздействия деградации грунта и морозного пучения на водопропускные трубы. Введение динамического коэффициента, при проектировании водопропускных труб и мостов грунтозасыпной конструкции.
- п. 15 – разработка метода улучшения свойств сталефибробетона в тонкостенных конструкциях ориентацией фибр магнитным полем (RU 2 451 647 C1).

Апробация работы. Все предположения, выдвинутые теории и полученные результаты исследования были представлены на всех уровнях международных и всероссийских конференций, семинаров и выставок: Международная научно-практическая конференция «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов». XIX научные чтения» (г. Белгород, 05–08 октября 2010 года), международная конференция «Актуальные проблемы современного строительства, энергосберегающие технологии» (г. Пенза, 01–02 декабря 2011 года), всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве» (г. Пермь, 19–20 мая 2011 года), VI Международная научно-техническая конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России» (г. Волгоград, 15–17 мая 2012 года), международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы городского строительства» (г. Пенза, 09–11 декабря 2013 года), межвузовская научно-практическая конференция «Инновационные технологии в мостостроении и дорожной инфраструктуре» (г. Санкт-Петербург, 30 января 2014 года), International scientific and practical conference «Transport: logistics, construction, maintenance, management» (г. Екатеринбург, 17–30 марта 2022 года), VI Всероссийская национальная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры» (г. Ростов-на-Дону, 27–28 февраля 2024), международная научно-практическая конференция «Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта (RND RNAT 2024)» (г. Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года).

Публикации. Результаты исследований, предложенные научные теории и методики были отражены в 29 работах. В журналах, включенных Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук – 5 работ. В рецензируемых научных журналах в Scopus – 1 работа. Патенты на изобретения – 5 штук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из следующих глав: введение, пять частей основной части исследования, основных выводов по результатам работы, списка использованной литературы

из 114 наименований и двух приложений. Представлена на 183 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показана его научная новизна и практическая ценность.

В первой главе диссертации проведен обзор истории применения сталефибробетона в России и мире. Развитие сталефибробетона, как конструктивного материала для высоконагруженных конструкций подверженных циклическим нагрузкам.

Рассмотрено влияние геометрических параметров фибр на приготовление и удобоукладываемость сталефибробетона. Рассмотрены процессы приготовления сталефибробетонных смесей. Выявлены наиболее сложные этапы и операции – наиболее ответственной операцией в технологическом процессе приготовления сталефибробетонных смесей является этап введения фибры вготавливаемую смесь. Качество сталефибробетонной смеси зависит прежде всего от равномерности распределения фибр в бетоне, на которую основное влияние оказывают параметры фибры и крупного заполнителя, тип смесителя и способ подачи фибры в него. Сделан вывод о необходимости совершенствования состава смесей добавлением современных пластифицирующих добавок, что намного увеличит удобоукладываемость смеси, а значит упростит процесс производства.

Произведен анализ применения сталефибробетона в водопропускных трубах.

В результате работы были выделены основные преимущества сталефибробетона над традиционными материалами (бетон, ориентированно-армированным железобетон), делающими его применение в конструкциях водопропускных труб и грунтозасыпных мостов наиболее подходящим материалом:

- повышенные эксплуатационные характеристики, такие как морозостойкость – F_1 , а также морозостойкость в солях – F_2 , за счет уменьшения воздухововлечения и изменения качественной и количественной поровой структуры бетона-заполнителя, введением металлической фибры, что позволяет использовать сталефибробетонные конструкции в сложных коррозионных условиях;
- ориентация металлических фибр в процессе изготовления изделий по линиям основных напряжений позволит отказаться от применения стержневой арматуры АIII;
- возможность автоматизации и роботизации процесса выпуска сборных блоков и процесса строительства.

По результатам выполненной работы по изучению возможности поворота фибр в теле бетона – матрицы был разработан «Способ ориентации

металлических дисперсно-армирующих элементов в бетоне» отраженный в патенте RU 2 451 647 С1.

Метод приготовления сталефибробетонной смеси предлагается автоматизировать с точным добавлением всех компонентов включающих: воду, связующее в данном случае цемент, фракционированный мелкий заполнитель – фракций 2 – 4 мм и крупный заполнитель – кубовидный щебень фракцией 10 – 15 мм

В полученную смесь, после ее полного замешивания вводится стальная фибра диаметром не более 1,5 мм, длиной не более 70,0 мм.

Далее готовую смесь укладывают в виброопалубку, расположенную в соленоиде с электромагнитным полем индукцией в 0,1 – 0,4 тесла.

На рисунке 1 показана принципиальная схема последовательности операций, при производстве сталефибробетонных блоков по предложенной технологии.

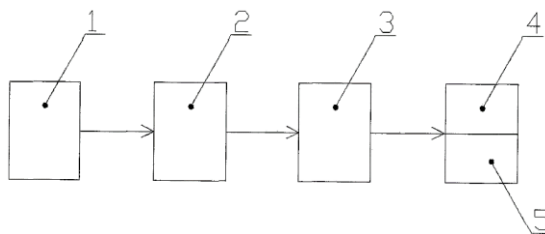


Рисунок 1 – Принципиальная схема последовательности операций предложенной технологии при производстве сталефибробетонных блоков.

1 – замешивание бетона – матрицы; 2 – введение стальной фибры; 3 – передача сталефибробетонной смеси в виброопалубку; перемещение виброопалубки в соленоид, для воздействия электромагнитным полем – 4 и вибрацией – 5.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с определением давления грунта на конструкции водопропускных труб в насыпи. Отмечается, что определение давления на водопропускные трубы связано с некоторыми трудностями, вызванными характером взаимодействия сооружений и окружающего грунтового массива, а также многообразием и сложностью однозначного учета грунтовых условий. Давление грунта определяется целым рядом факторов, таких как жесткость трубы, условия укладки, принятое основание и т.д.

Описана эволюция ключевых зарубежных гипотез и методик расчета, не потерявших свое фундаментальное значения до наших дней. Разбираются предлагаемые ими расчетные схемы и схемы сбора нагрузок, введенные упрощения, допущения и границы их применимости, а также подходы к интеграции в расчет перечисленных выше параметров.

Отдельно освещены концептуальные основы, принятые в иностранном инженерном деле: метод прямого расчета конструкций и метод непрямого проектирования для бетонных труб высокой жесткости.

Далее проведен сопоставительный разбор трех нормативных систем:

1. Отечественная база – СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5);
2. Единые требования Австралии и Новой Зеландии – AS/NZS 3725.
3. Североамериканский документ – AASHTO LRFD Bridge Design

Specifications.

Для каждого стандарта рассматривается несколько загрузок с учетом их специфики, в качестве переменных принимаются характеристики трубы, основания и окружающего грунта.

В результате расчета анализируются значения вертикального и бокового давления грунта для жестких и гибких труб, учитываемые факторы и допущения, на основании чего сделан вывод о преимуществах, недостатках и ограничениях каждого из упомянутых подходов, а также высказываются соображения о возможных направлениях перспективного развития и совершенствования норм.

В таблице 1 сопоставлены значения вертикального и бокового давления по каждому из стандартов, на рисунке 2 приведен график вертикального давления для жестких труб. Вертикальное давление на рисунке 2 имеет сопоставимые значения кроме резко отклоняющейся линии "NZS/AS траншея", отбросив их, наибольшее отклонение в 23% от усредненных значений СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5) имеет стандарт AASHTO. Таблица 1 – Сопоставление значений вертикального и бокового давлений по каждому из стандартов

№ п/п	Краткое описание характеристик трубы	Вертикальное давление, кН/м ²			Боковое давление, кН/м ²		
		СП 35	AASHTO ¹	AS/NZS ²	СП 35	AASHTO ¹	AS/NZS ²
1	Жесткая железобетонная труба d=1 м Н=5м	157,26	123,9	75,67/ 95,58	26,55	33,63	-
2	То же при Н=10м	265,88	247,8	95,58/ 215,94	56,05	67,26	-
3	Гибкая металлическая труба d=1м Н=5м	88,50	88,50	88,50	26,55	-	-
4	То же при Н=10м	177,0	177,0	177,0	53,1	-	-

¹Для AASHTO приведены средние значения от частных по типам 1-4.

²Для AS/NZS приведены значения для условия траншея/насыпь.

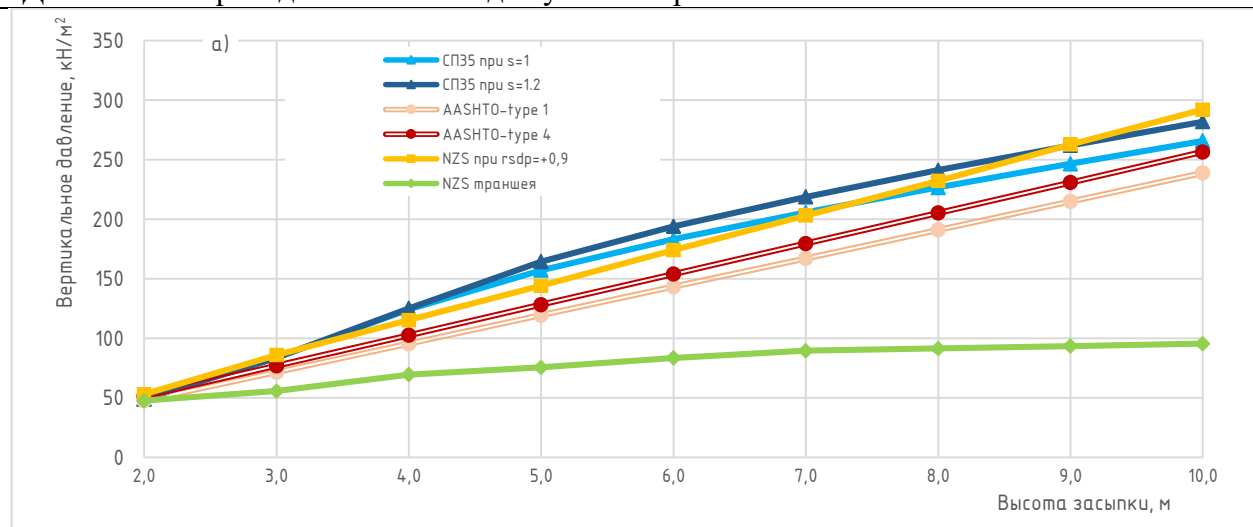


Рисунок 2 – Вертикальное давление на жесткие трубы при d=1м;

Таблица 2 – Сравнение основных показателей СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5), Australia/New Zealand Standard AS/NZS 3725, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

№ п/п	Показатель	СП 35	AASHTO	AS/NZS
1	Учет условий укладки	Нет	Нет	Да
2	Учет типа основания	Да	Да	Да
3	Характеристики грунта	Да	~	~
4	Материал трубы	Да	Да	Да
5	Требования к уплотнению	~	Да	Да

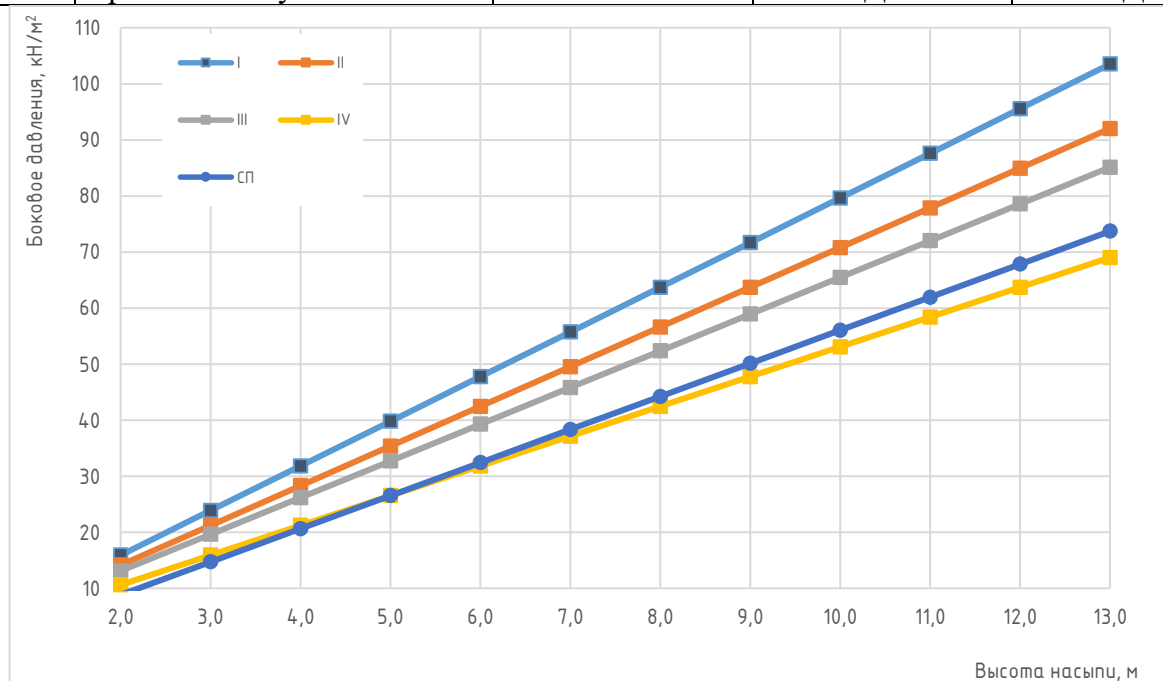


Рисунок 3 – Сравнение бокового давления по AASHTO LRFD Bridge Design Specifications и СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5)

Рассмотренные методы и стандарты, используемые при расчете водопропускных труб в России, Америке и Австралии используют абсолютно разные методы, начиная со сбора нагрузок, заканчивая определением несущей способности. Примечательно, что, несмотря на значительные различия в методиках, конечный итог расчета – значения требуемой площади армирования сопоставимы, но все же в соответствии СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5) эти значения больше до 35%, что позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшей работы по совершенствованию как расчетных схем со сбором нагрузок, так и самих методов расчета, изложенных в СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1-5).

В третьей главе рассмотрено применение частного случая теории оболочек вращения – «полубезмоментной» теории оболочек В.З. Власова. Данная теории представляет определенный интерес для расчета сталефибробетонных конструкций грунтозасыпных мостов. К преимуществам данной теории относятся ее относительная простота и понятность (по

сравнению с другими теориями оболочек), при этом точность описания конструкции и сути ее работы остаются на очень высоком уровне. Помимо общих положений теории в данной главе было рассмотрено практическое применение теории.

Разрешающее уравнение по теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова для цилиндрической оболочки имеет вид:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{R} \cdot \Omega \cdot M_\beta = q, \quad (1)$$

где: R – радиус оболочки;

N_α – продольное усилие, действующее вдоль оболочки;

M_β – изгибающий момент, действующий поперек оболочки;

Ω – дифференциальный оператор Власова;

q – внешняя нагрузка.

Компонент нагрузки P_α в подавляющем большинстве задач расчета конструкций может не учитываться. Особенность грунтозасыпных конструкций состоит в их совместной работе с окружающим грунтом. Грунт создает нагрузку, является основанием для трубы и средой, передающей надземные нагрузки. Допуская, что грунтозасыпной мост не изменяет предельного напряженного состояния окружающего грунта, рассматриваемого как сыпучее тело, можно получить следующие выражения для составляющих нагрузки в точке верхней половины трубы, лежащей на глубине y от поверхности насыпи:

$$P_z = \gamma y (\cos^2 \beta + \xi \sin^2 \beta), \quad P_\beta = \gamma y (1 - \xi) \sin \beta \cos \beta, \quad P_\alpha = 0, \quad (2)$$

где: $\xi = \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)}$;

φ – угол внутреннего трения грунта;

γ – объемный вес грунта;

θ – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью (рисунок 4).

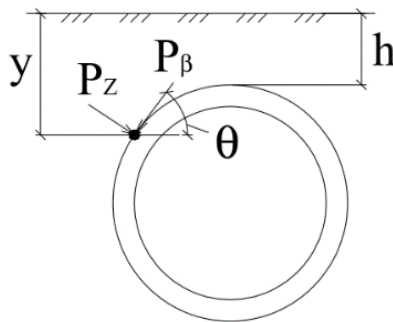


Рисунок 4 – Нагрузки, действующие на оболочку в поперечном направлении

Решая вариационные уравнения В.З. Власова с учетом (2) получим выражения для функций $F_1(\alpha)$, $F_2(\alpha)$, $F_3(\alpha)$, а значит и для $\Phi(\alpha, \beta)$.

С учетом этого выражения для усилий, действующих в полукруглой арке, будут следующими:

$$N_\alpha = - \frac{2(1-\xi)\gamma H \sin \beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]. \quad (3)$$

$$N_{\beta} = -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin \beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]. \quad (4)$$

$$M_{\beta} = -\frac{\gamma H(\xi-1)}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin 2\beta + 8 \sin 3\beta \right], \quad (5)$$

где γ – объемный вес грунта;

H – высота засыпки арки от основания;

$\beta = \theta$ – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью;

ν – коэффициент Пуассона (для суглинка $\nu = 0,35$);

α – продольная координата (для круговой арки – $\alpha = 1$);

l – длина оболочки;

Сравнительный анализ полученных уравнений в соответствии с применением полубезмоментной теории В.З.Власова с «нормативным методом расчета» представленным в СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84 (с Изменениями № 1-5)*

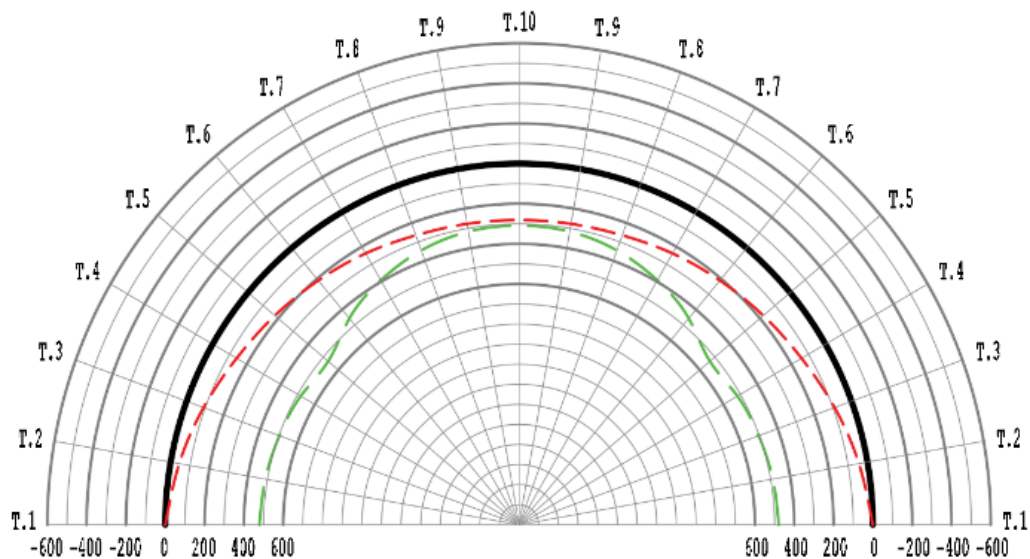


Рисунок 5 – Сравнение эпюр продольной силы (N , т)

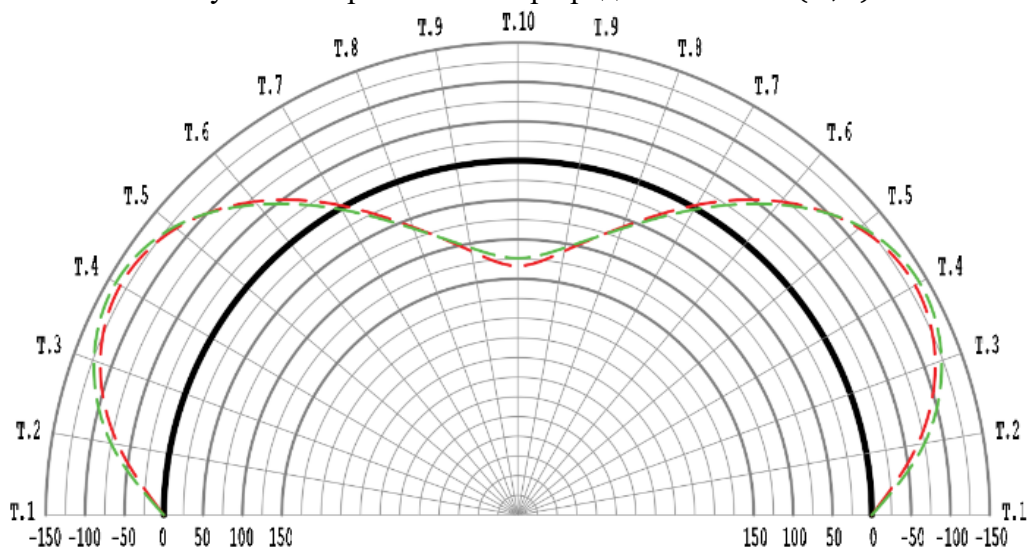


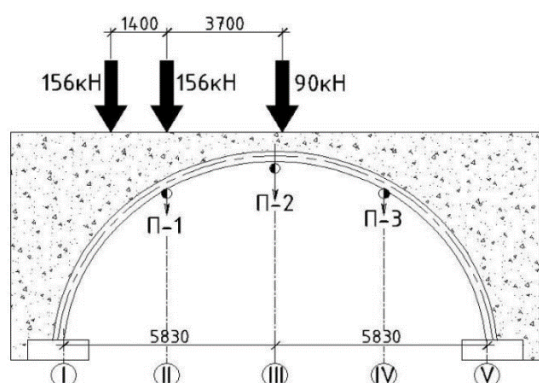
Рисунок 6 – Сравнение эпюр моментов (M , т · м)

В результате можно сделать вывод, что применение полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова дает возможность получить значения максимальных усилий достаточно быстро и точно с помощью простых формул.

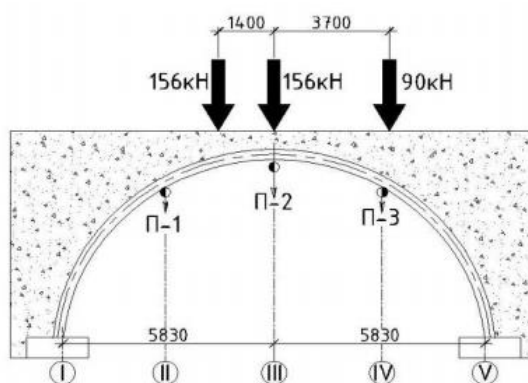
В четвертой главе был применен усовершенствованный подход к моделированию распределения давления от временной нагрузки решением задачи Буссинеска путем введения следующих расчетных положений:

1. учет распределения, в толще грунта, давления от статической испытательной нагрузки по ширине свода несущего элемента;
2. учет горизонтальной составляющей давления от воздействия статической испытательной нагрузки;
3. учет отпора грунтового массива путем введения коэффициента постели.

а)



б)



в)

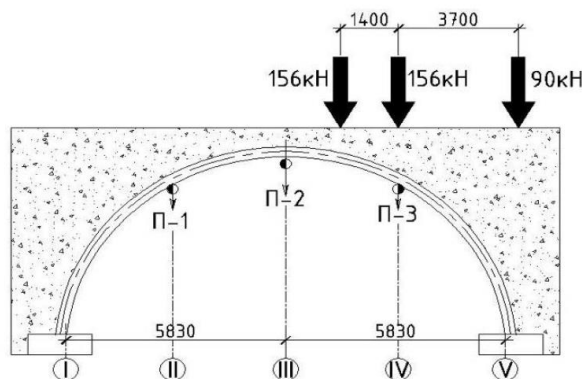


Рисунок 7 — Схемы загрузки моста испытательной нагрузкой при измерении прогибов в сечении а) $n=II$; б) $n=III$; в) $n=IV$

Определение вертикального давления на поверхность арки

Закон распределения и передачи вертикального давления в грунтовом массиве по длине пролета арки в общем виде примем в виде задачи Буссинеска:

$$p_{jnz} = \frac{3 \cdot N_j \cdot z^3}{2 \cdot \pi \cdot (z^2 + x^2 + y^2)^{2,5}}, \quad (6)$$

где p_{jnz} — величина переданного вертикального давления от силы N_j в точке полупространства в сечении n , kH/m^2 ($n=II, III, IV$);

N_j — величина сосредоточенной нагрузки от колеса, kH ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6$);

z — глубина залегания точки, в которой определяется давление;

x, y – координаты горизонтальной проекции точки, в которой определяется давление, относительно замка арки

Законы изменения вертикального давления $p_{nz}(x, y)$ имеют следующий вид, представленный на рисунках 8, 9, 10.

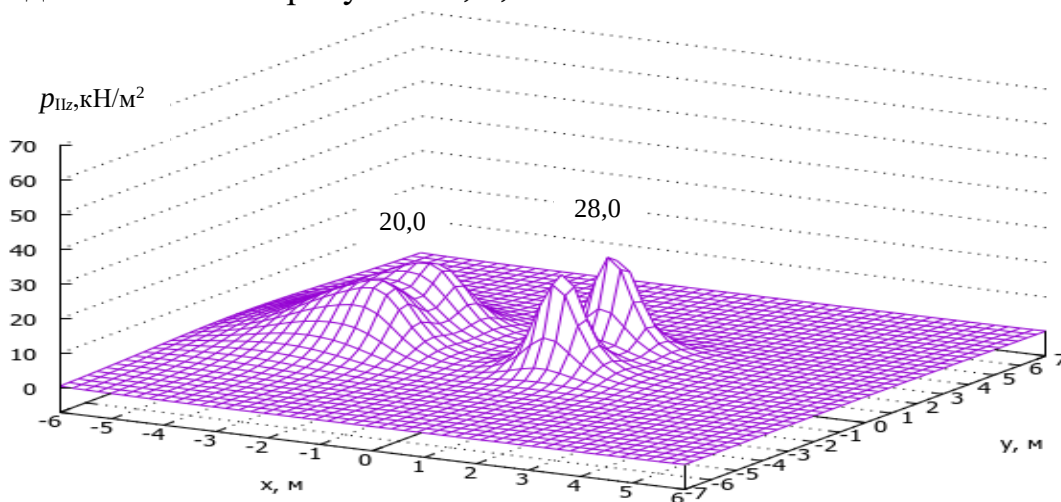


Рисунок 8 – Распределение напряжений p_{IIz} по поверхности арки.

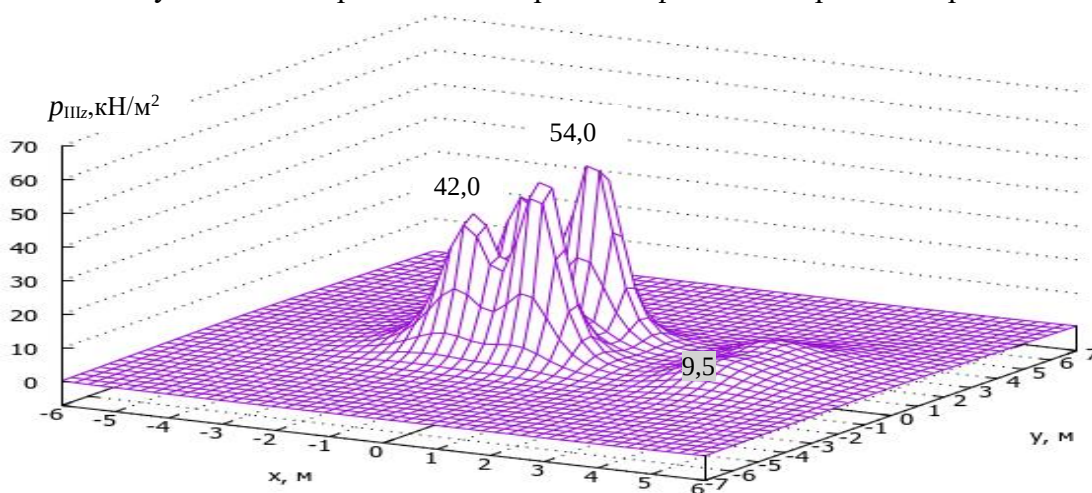


Рисунок 9 – Распределение напряжений p_{IIIz} по поверхности арки.

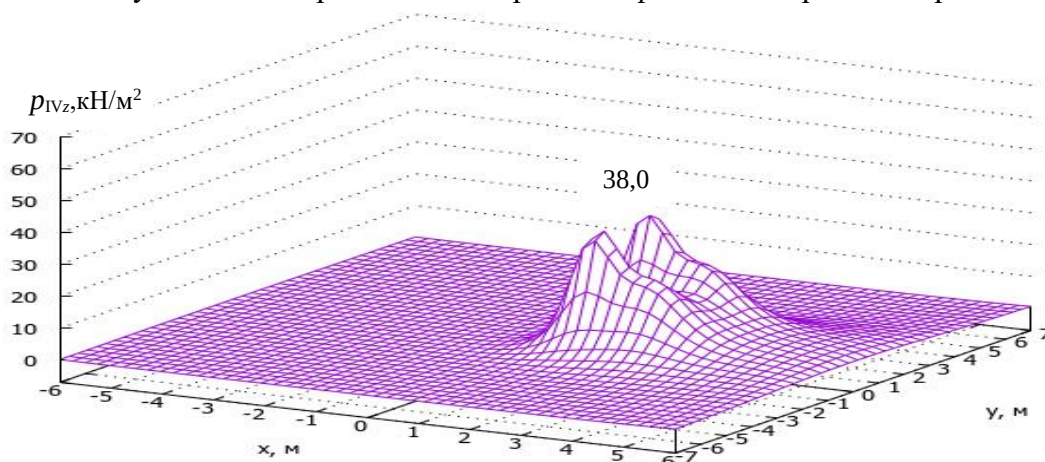


Рисунок 10 – Распределение напряжений p_{IVz} по поверхности арки.

Определение горизонтального давления на поверхность арки

Закон распределения и передачи горизонтального давления в грунтовом массиве по длине пролета арки в общем виде примем в виде задачи Буссинеска:

$$p_{jnx} = \frac{3 \cdot N_j \cdot z^2 \cdot x}{2 \cdot \pi \cdot (z^2 + x^2 + y^2)^{2,5}}, \quad (7)$$

обозначения в формуле (7) – см. обозначения в формуле (6).

Таблица 3 – Сравнение результатов расчета

Перемещения в расчетных сечениях,		Расчетные сечения, к					
		1		2		3	
измеренные при натурных испытаниях $z_{пэ}$, мм	$z_{II э}$, мм	-0,33	%	-0,10	%	0,08	%
	$z_{III э}$, мм	-0,12		-0,41		-0,06	
	$z_{IV э}$, мм	0,10		-0,20		-0,30	
вычисленные усовершенствованным методом $\Delta_{пк}$, мм	$\Delta_{II к}$, мм	-0,26	21	-0,13	23	0,10	20
	$\Delta_{III к}$, мм	-0,13	8	-0,36	12	-0,07	14
	$\Delta_{IV к}$, мм	0,13	23	-0,17	15	-0,23	23

Сравнивая вычисленные значения Δ_k с вычисленными значениями, полученными путем моделирования сооружения в ПК «Ли́ра» z_k , а также с перемещениями, полученными в ходе натурных испытаний $z_{э}$, можно сделать вывод, что предложенная расчетная модель, использующая теорию линейно деформируемого полупространства для вычисления давления, действующего от временных нагрузок, достоверно отражает работу грунтозасыпных конструкций.

В пятой главе представлены следующие конструкции:

Конструкция водопропускной трубы из сборных блоков (RU 2 610 955 C2 «Водопропускное устройство»)

Конструкция водопропускной трубы, состоит из фрагментов, выполненных из сталефибробетона. Разработано два вида фрагментов: фрагменты середины трубы, имеющие форму равнобедренной трапеции с равными углами наклона сторон к основанию в 30 градусов, и фрагменты крайних участков трубы, имеющие форму прямоугольной трапеции с углом наклона стороны к основанию также 30 градусов, каждый фрагмент выполнен вогнутым с радиусом, равным радиусу трубы в сборе, толщина каждого

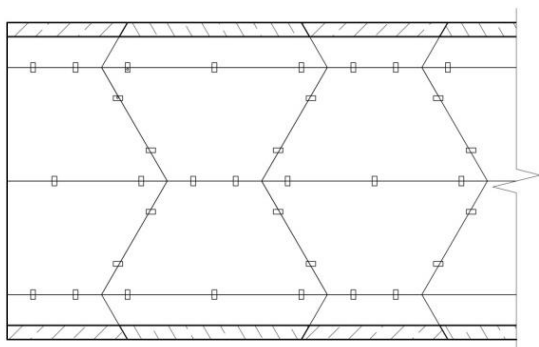


Рисунок 11 – Продольное сечение водопропускной трубы

фрагмента составляет от 50 мм до 300 мм., в зависимости от воспринимаемых нагрузок. На всех сторонах каждого фрагмента расположены закладные устройства в виде металлических пластин с отверстиями для закладных болтов, скрепляющих фрагменты, при сборке водопропускной трубы фрагменты располагаются таким образом, чтобы большое основание одного фрагмента прилегало к большому основанию следующего фрагмента, а малое основание к малому, по длине трубы

фрагменты прилегают боковыми сторонами друг к другу и объединяются болтовыми соединениями через закладные детали на гранях фрагментов.

Конструкция грунтозасыпного моста (RU 2 638 218 C1 «Грунтозасыпной мост»)

Представленный грунтозасыпной мост, включает опоры, опертую на них арку, грунтовую обойму засыпки и дорожную одежду, опоры выполнены сборными, на опоры опирается арка параболической формы, выполненная из сталефибробетона и состоящая из отдельных блоков, шарнирно соединенных друг с другом по внешней поверхности арки, на верхней поверхности каждого блока по его углам выполнены ниши, в которых размещены металлические закладные проушины, с одной стороны блока по две штуки в нише, а с противоположной – по четыре, каждая проушина имеет отверстие для болтов, ось которых совпадает с точкой пересечения боковой и верхней поверхности блоков, на соприкасающихся поверхностях каждого блока выполнены с одной стороны выступы, а с другой стороны – углубления, которые совмещены при монтаже арки, центральная часть которой является безотпорной зоной, не испытывающей бокового отпора грунта, на границах безотпорной зоны размещены песчаные подушки, на которые опираются переходные железобетонные плиты, на плиты насыпан слой песка, после его уплотнения в пределах грунтовой обоймы засыпки уложена полимерная георешетка с уклоном от вертикальной оси арки в сторону опор моста, а поверх песка уложены слои дорожной одежды, при этом фасад моста по всей высоте выложен габионами, соединенными между собой, последний ряд которых выполняет функцию перильных ограждений, причем габионы установлены в процессе устройства грунтовой обоймы засыпки моста.

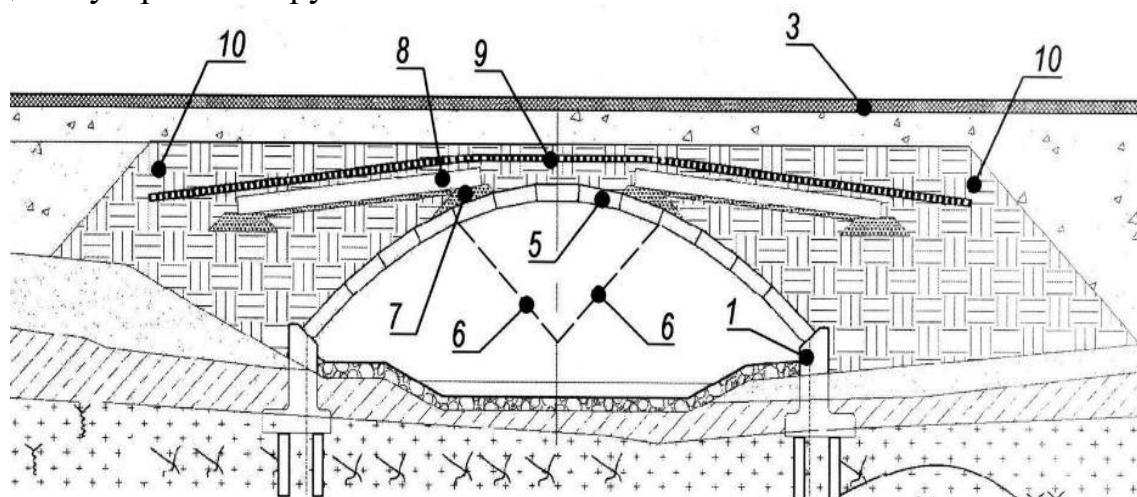


Рисунок 12 – Разрез моста вдоль оси дороги.

- 1 – опора; 3 – дорожная одежда; 5 – сталефибробетонная арка;
- 6 – граница безотпорной зоны; 7 – песчаная подушка;
- 8 – переходные железобетонные плиты; 9 – полимерная георешетка;
- 10 – грунтовой обойма засыпки.

Конструкция фундамента для грунтозасыпных мостов (RU 2 830 449 C1 «Монолитный фундамент»)

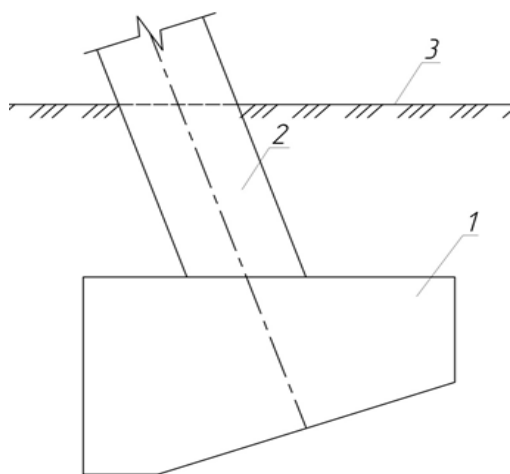


Рисунок 13 – Общий вид фундамента.
1 – монолитный фундамент; 2 – опоры;
3 – поверхность грунта.

Вариативность угла наклона подошвы фундамента влечет за собой изменение пропорций между вертикальной и горизонтальной проекциями равнодействующей сил относительно плоскости основания. При увеличении нормальной составляющей (перпендикулярной наклонной поверхности) возрастает сила трения в контакте с грунтом, тогда как горизонтальная сдвигающая компонента, напротив, снижается. Модернизация классического прямоугольного фундамента (с четырьмя прямыми углами) в пятиугольную конфигурацию позволяет сформировать дополнительную наклонную

грань, служащую подошвой. Данное решение обеспечивает повышение общей несущей способности разрабатываемого фундамента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сталефибробетонные грунтозасыпные мостовые конструкции – перспективное решение для транспортного строительства. Их возможно использовать как водопропускные трубы, путепроводы, тоннели, защитные галереи, а также автомобильные и железнодорожные мосты. Такие конструкции выгодны вдвойне: при возведении они нередко в несколько раз дешевле обычных балочных разрезных мостов, а в процессе эксплуатации в сложных коррозионных условиях требуют меньших затрат на обслуживание.

1. Исследования повреждений железобетонных водопропускных труб подтверждают: агрессивные среды являются главным негативным фактором сокращающим их срок службы. При отсутствии активной и пассивной гидроизоляций защиты срок эксплуатации сооружения уменьшается в несколько раз, одновременно повышается угроза обрушения.

Решением проблемы становится сталефибробетон. Он выгодно отличается от традиционного бетона многократно более высокими характеристиками (растяжение, срез, трещиностойкость, жаропрочность, вязкость, износостойкость). Благодаря этому его применение критически важно для конструкций, работающих в агрессивной среде или испытывающих циклические удары – в частности, для звеньев водопропускных труб и арок мостов грунтозасыпной конструкции.

2. Разработанная в рамках диссертационной работы технология управляемого армирования бетона металлическими фибрами с использованием электромагнитного поля в комбинации с вибрационным воздействием (патент

RU 2 451 647 C1), при строительстве опытной модели позволит обеспечивать упорядоченную ориентацию дисперсных элементов по всему объему материала, что особенно важно для производства и эксплуатации тонкостенных конструкций.

В результате применения предлагаемой технологии достигается:

- полное использование прочностных свойств металлических фибр;
- повышение эксплуатационных характеристик готового изделия;
- снижение расхода как фибры, так и самой бетонной смеси.

Кроме того, технология позволяет полностью отказаться от традиционной стержневой арматуры, что создает условия для автоматизации и роботизации производственных линий при изготовлении сталефибробетонных изделий.

3. Опираясь на математический аппарат полубезмоментной теории оболочек, разработанной В.З. Власовым, автору удалось вывести алгоритм расчета, включающий систему расчетных уравнений, описывающих внутренние усилия в сталефибробетонных арочных конструкциях мостов грунтозасыпной конструкции. Принципиальная особенность и одновременно главное достоинство этих уравнений заключается в их исключительной простоте. В отличие от громоздкого и многоэтапного анализа с использованием пространственных конечноэлементных моделей, расчет по предложенному алгоритму требует от инженера задания ограниченного набора исходных данных, количество которых не превышает десяти. Сам же вычислительный алгоритм сводится к последовательному применению всего трех основных формул, что делает процедуру определения усилий понятной и легко проверяемой.

4. В четвертой главе диссертации предложенные расчетные схемы прошли апробацию. Результаты показали, что наиболее достоверные данные обеспечивают пространственные модели, в которых грунт обратной засыпки рассматривается как нелинейно – деформируемое полубесконечное упругое тело, то есть с использованием решения задачи Буссинеска. Выведенные в результате исследования законы распределения напряжений в грунте и совместной работы грунта обратной засыпки и несущего элемента пролетного строения могут быть использованы для создания пространственных расчетных схем в конечно-элементной постановке. Решением контактной задачи взаимодействия грунта обратной засыпки и несущего элемента пролетного строения является нелинейная работа конечного элемента «грунт обратной засыпки»:

- Передача сжимающих напряжений в соответствии с теорией нелинейно деформируемого полубесконечного упругого тела (задача Буссинеска).
- Передача растягивающих напряжений невозможна, ввиду отсутствия коэффициента сцепления у грунта обратной засыпки.

- Восприятие сжимающих напряжений на контакте грунт – пролетное строение через коэффициент Пуассона, выраженный коэффициентом постели.

5. В пятой главе диссертационной работы представлены сконструированные и запатентованные автором новые конструктивные формы грунтозасыпных мостов и водопропускных труб. В частности, в ней приведено описание трех технических решений: конструкции грунтозасыпного сталефибробетонного моста (патент RU 2 638 218 С1 «Грунтозасыпной мост»), конструкции водопропускной трубы (патент RU 2 610 955 С2 «Водопропускное устройство») и конструкции монолитного фундамента для грунтозасыпных мостов (патент RU 2 830 449 С1 «Монолитный фундамент»).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ по специальности 2.1.8:

1. Овчинников, И. Г. Применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова к расчету фибробетонных арочных конструкций и труб / И. Г. Овчинников, А. С. Пермикин // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 6(31). – С. 145. – DOI 10.15862/05KO615. – EDN VOBHNS.

2. Пермикин, А. С. Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментов дорожно-транспортных сооружений на сезоннопромерзающих грунтах / А. С. Пермикин, И. Г. Овчинников, А. И. Грицук // Транспортные сооружения. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 1. – DOI 10.15862/03SATS420. – EDN XSTOJC.

3. Пермикин, А. С. Анализ отечественных и зарубежных нормативных методов определения давления грунта на водопропускные трубы / А. С. Пермикин, К. Ю. Астанков, И. Г. Овчинников // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2024. – № 1. – С. 26-41. – DOI 10.15593/24111678/2024.01.03. – EDN CLJREC.

4. Пермикин, А. С. Применение задачи Буссинеска для определения давления на поверхность грунтозасыпных мостов / А. С. Пермикин, И. И. Овчинников // Транспортные сооружения. – 2024. – Т. 11, № 2. – DOI 10.15862/05SATS224. – EDN SCZGKY.

5. Пермикин, А. С. Сравнительное исследование нормативных требований России и зарубежных стран к армированию водопропускных труб / А. С. Пермикин // Транспортные сооружения. – 2025. – Т. 12, № 4. – DOI 10.15862/13SATS425. – EDN RQNALJ.

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

6. Calculation of soil pressure on culverts according to Russian and foreign standards / A. I. Gricuk, A. S. Permikin, I. G. Ovchinnikov, A. S. Demidov // AIP Conference Proceedings, Perm, 01–03 мая 2021 года. – Perm, 2021. – P. 060003. – DOI 10.1063/5.0063651. – EDN WQBBJS.

Публикации в других научных изданиях:

7. Пермикин А.С., Осокин И.А. Технология применения электромагнитного поля для ориентации металлических дискретно-армирующих элементов в бетоне матрицы. // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. науч. – практ. конф., Белгород, 5-8 окт. 2010 г. / Белгор. гос. технолог. Ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч.1. С. 244-247.

8. Пермикин А.С., Осокин И.А. Технология ориентации фибр в бетоне. // Общие вопросы транспорта. Моделирование и оптимизация в логистических системах: сб. научн. трудов //Под научн. ред. Е.Н. Тимухиной, канд. техн. наук. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. Вып. 89(172).2011. С.73-82.

9. Пермикин А. С., Осокин И.А. Применение дисперсно-армированных материалов в водопропускных трубах круглого сечения//Молодежь и научно-технический прогресс в

дорожной отрасли юга России: материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-17 мая 2012 г., Волгоград / ВолгГАСУ, 2012 с. 26-29. ISBN 978-5-98276-514-7. – EDN RPBVRX.

10.Пермикин А.С., Овчинников И.И., Осокин И.А. Расчетные схемы при моделировании поведения водопропускных труб с учетом реальных условий эксплуатации. // Материалы международной конференции «Сучасні методи проектування, будівництва та експлуатації систем водовідводу на автомобільних дорогах» (1 – 2 березня 2012 року). – Киев: НТУ, 2012. С.72-78.

11.Пермикин А.С., Овчинников И.Г. Влияние геометрических параметров фибр на приготовление и удобоукладываемость сталефибробетона. // Бетон и железобетон в Украине. 2012 – вып №6 (70). – С 34-36.

12.Пермикин А.С. Влияние геометрических параметров фибр на приготовление и удобоукладываемость сталефибробетона. // Матеріали Всеукраїнської Інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (21 – 22 листопада 2012 року). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. С.205-208.

13.Пермикин А.С., Осокин И.А. Технология применения электромагнитного поля для ориентации металлических дискретно-армирующих элементов в бетоне матрицы. // Технологии бетонов. М: ООО «Композит XXI век».2013 – вып №1 (78). – С 44-45.

14.Пермикин А. С., Ионова Д.К. Удобоукладываемость сталефибробетона //Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, 26-29 июня 2013 г., Тула / Тульский государственный университет – Тула: ТулГУ, 2013 с. 41-42.

15.Пермикин А. С., Снигирева Т.М. Технологии производства фибробетона //Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, 26-29 июня 2013 г., Тула / Тульский государственный университет – Тула: ТулГУ, 2013 с. 135-136.

16.Пермикин А. С., Снигирева Т.М. Расчеты нагрузки от давления грунта на водопропускные трубы по различным нормативным документам. //Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, 26-29 июня 2013 г., Тула / Тульский государственный университет – Тула: ТулГУ, 2013 с. 138-139.

17.Пермикин А. С., Овчинников И.И. Применение полубезмоментной теории В.З. Власова для моделирования поведения круглых фибробетонных водопропускных автодорожных труб. // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Пенза, 09–11 декабря 2013 года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пензенский государственный университет архитектуры и строительства". – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2013. – С. 342-352.

18.Пермикин А.С., Осокин. И.А. Анализ методики расчета предельных деформаций поперечного сечения на примере эксплуатации гофрированных водопропускных труб уральского региона. // Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. М. 2013. - вып. 30/2. - С. 224-234.

19.Пермикин А.С., Медведев В.А. Конгломераты. // Перспектива – 2018:сб. научн. тр. студентов. – Екатеринбург:УрГУПС. Вып. 2(233). – С. 92-100.

20.Пермикин А.С., Волков Н.В. Аналитический расчет грунтозасыпного моста. // Перспектива – 2019:сб. научн. тр. студентов. – Екатеринбург:УрГУПС. Вып. 2. – С. 4-18.

21.Пермикин А.С., Комардин Д. В. Анализ динамических воздействий от подвижной нагрузки на водопропускные трубы и арочные конструкции грунтозасыпных мостов / Д. В. Комардин // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 182-184. – EDN

FSKNNK.

22.Пермикин, А. С. Разработка новой конструкции водопропускных труб под насыпями автомобильных и железных дорог / А. С. Пермикин, И. Г. Овчинников // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2024. – Т. 2. – С. 399-405. – EDN DJQIE.

23.Пермикин А.С., Овчинников И. И. Разработка новой конструкции арочных грунтозасыпных мостов под насыпями автомобильных и железных дорог // Дорожная держава. – 2024. – № 124. – С. 41-43.

24.Пермикин А.С., Комардин Д. В. Анализ применения сталефибробетона как основного материала при разработке грунтозасыпных мостов / Д. В. Комардин, А. С. Пермикин // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 112-114. – EDN ATCVZL.

Патенты на изобретения и полезные модели:

25.Патент № 2451647 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/00. способ ориентации металлических дисперсно-армирующих элементов в бетоне : № 2010144271/03 : заявл. 28.10.2010 : опубл. 27.05.2012 / И. А. Осокин, А. С. Пермикин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС). – EDN MWMLYB.

26.Патент № 2567253 С1 Российская Федерация, МПК E01D 4/00. Арочный мост : № 2014122993/03 : заявл. 05.06.2014 : опубл. 10.11.2015 / А. Ю. Фролов, А. С. Пермикин, И. С. Осокин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС). – EDN ZFTUIP.

27.Патент № 2610955 С Российская Федерация, МПК E01F 5/00. водопропускное устройство : № 2015129626 : заявл. 17.07.2015 : опубл. 17.02.2017 / А. А. Архангельский, А. С. Пермикин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС). – EDN XMJOMY.

28.Патент № 2638218 С Российская Федерация, МПК E01D 4/00, E01D 21/00. грунтозасыпной мост : № 2016135402 : заявл. 30.08.2016 : опубл. 12.12.2017 / А. С. Пермикин, Н. А. Мазуренко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС). – EDN BXGBMA.

29.Патент № 2830449 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/01. Монолитный фундамент : № 2023133656 : заявл. 12.12.2023 : опубл. 19.11.2024 / В. Е. Зеленин, А. С. Пермикин, А. С. Кузнецов, А. С. Демидов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения". – EDN TUQLCQ.

Подписано в печать 22.10.2026. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Усл. печ. л. 1. Тираж 90 экз. Заказ № 877.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»
620034 г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66
Отпечатано: Издательско-полиграфический центр УрГУПС
620034 г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66