

На правах рукописи



**МОХОВИКОВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ ЛЕЖНЕЙ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ  
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ОПОР КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ И  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**Специальность: 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт Оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор

**Буслов Анатолий Семенович**

Официальные оппоненты:

**Абелев Марк Юрьевич**

доктор технических наук, профессор,

Центр инновационных технологий в строительстве  
Института ДПО ГАСИС НИУ "Высшая школа  
экономики", директор

**Марголин Владимир Михайлович**

кандидат технических наук,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

"Национальный исследовательский Московский

государственный строительный университет" (НИУ

МГСУ), доцент кафедры «Технология и организация

строительного производства»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Московский политехнический университет»

Защита состоится «14» июня 2018 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г.Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте [www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Стратегией развития железнодорожного транспорта России до 2030 г. предусмотрено строительство более 16 тыс. км железных дорог, оснащенных новыми линиями контактных сетей. На тот же период в соответствии с энергетической стратегией Минэнерго РФ объем вводов линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 110 кВ и выше в повышенном, усредненном и пониженном вариантах роста уровня электро- и теплопотребления оценивается соответственно величинами: 545, 415 и 285 тыс. км, из них высоковольтные линии (ВЛ) напряжением 330 кВ и выше соответственно 65, 50 и 35 тыс. км.

Одними из основных вопросов в указанных стратегиях развития являются: «обеспечение безопасности на объектах железнодорожного транспорта» и «обеспечение надежности и безопасности работы системы электроснабжения России в нормальных и чрезвычайных ситуациях».

Для фиксации проводов ЛЭП и контактных сетей применяются различные конструкции опорно-поддерживающих устройств, включающих фундаментную часть, поэтому при большом объеме строительства в сложных инженерно-геологических условиях, требующем значительных материальных и финансовых затрат, вопросы повышения надежности и экономичности инженерных решений фундаментов опор приобретают достаточно актуальное значение.

Вопросы надежности особенно важны при применении одностоечных горизонтально нагруженных фундаментов опор ЛЭП и контактных сетей, имеющих достаточно широкое применение в строительстве. Несущая способность одностоечной опоры определяется степенью заземления ее в грунте. Свойства грунтов основания, как правило, неоднородны вдоль трассы линий электропередачи.

Необходимый уровень *эксплуатационной* надежности одностоечных горизонтально нагруженных опор вдоль трассы и компенсирование возможного разброса деформационных и прочностных характеристик грунтов основания могут быть обеспечены путем повышения запаса устойчивости опор за счет применения оптимальных размеров и количества лежней, создающих дополнительное реактивное сопротивление грунта нагружаемой опоре.

Надежность *методов расчета* опор с лежнями, в свою очередь, должна основываться на достаточной практической и экспериментальной базе исследований как основы расчетной модели конструкции. В то же время ряд вопросов работы опор с лежнями на горизонтальную нагрузку требует дополнительного изучения.

Проведение комплексных экспериментально-теоретических исследований деформационной и несущей способности горизонтально нагруженных опор с лежнями в

зависимости от их геометрических размеров и количества, высоты приложения нагрузки, а также разработка методов расчета на основе применения и дальнейшего развития теории расчета балок со сложной геометрией на упругом основании являются *актуальными* и соответствующими задачам обеспечения эксплуатационной безопасности, поставленным в транспортных и энергетических «Стратегиях развития в РФ».

**Степень разработанности темы.** Балки-ригели или «лежни», уложенные в грунте перпендикулярно стволу горизонтально нагруженной опоры для повышения ее несущей способности, имеют достаточно широкое применение. Несмотря на очевидную целесообразность такого инженерного решения, подтверждаемую на практике при возведении и эксплуатации опор ЛЭП и контактных сетей, данных экспериментальных исследований, позволяющих обоснованно назначить расчетную модель и с позиций *теоретического анализа* показать эффективность использования лежневых конструкций, в литературе опубликовано недостаточно.

Большинство существующих методов расчета горизонтально нагруженных опор по деформациям основаны, как правило, на предположении линейной зависимости коэффициента постели по глубине, что в полной мере характерно только для несвязных грунтов, однако редко отражает реальные инженерно-геологические и технологические особенности строительства.

Приближению расчетной модели к реальной картине работы горизонтально нагруженных опор с лежнями разных размеров и количества могут способствовать натурные экспериментальные исследования их деформаций, несущей способности, а также характера контактных давлений, необходимость в проведении которых достаточно актуальна ввиду их недостаточной освещенности в литературе.

Влияние высоты приложения горизонтальной нагрузки, толщины и длины, количества лежней на характер изменения перемещений и несущей способности опор в литературе практически не освещено.

В целом, можно констатировать, что в настоящее время вопросы технико-экономического обоснования выбора оптимального числа и размеров лежней, применяемых для повышения деформационной и несущей способности горизонтально нагруженных опор, изучены недостаточно.

Таким образом, возникает необходимость проведения комплексных экспериментально-теоретических исследований работы горизонтально нагруженных опор с лежнями с разработкой методов их расчета и выработкой рекомендаций по назначению их оптимальных размеров.

**Научно-техническая гипотеза** диссертационного исследования заключается в экспериментальном и теоретическом обосновании *предполагаемого* увеличения несущей способности и деформационной устойчивости горизонтально нагруженных опор контактной сети и линий электропередач (ЛЭП) при оснащении фундаментной части опор лежнями (отпорными ригелями) в зависимости от их геометрических размеров, числа и места расположения по глубине.

На основании вышеизложенного в данной диссертационной работе поставлена **цель**: определение эффективности использования лежней с целью повышения деформационной и несущей способности опор, работающих на горизонтальную нагрузку, в зависимости от их количества, геометрических размеров и высоты приложения нагрузки с разработкой метода их расчета.

**Задачи исследований.**

1) Изучение отечественного и зарубежного опыта исследований экспериментальных и теоретических основ расчета горизонтально нагруженных опор с лежнями.

2) Изготовление крупногабаритных моделей одностоечных опор, как без лежней, так и с лежнями одинаковых и разных размеров, с оснащением их соответствующими измерительными приборами с целью получения натуральных данных по перемещениям, несущей способности и характеру распределения контактных давлений по поверхности лежней и ствола подземной части опоры при действии горизонтальной нагрузки.

3) Проведение испытаний модельных конструкций в натуральных полевых условиях, фрагментарно моделирующих работу горизонтально нагруженных опор линий электропередач и контактной сети.

4) Выбор на основе выполненных экспериментальных исследований расчетной модели. Разработка метода расчета на основе принятой расчетной модели по двум группам предельных состояний опор с лежнями, работающих на горизонтальную нагрузку.

5) Проведение аналитических исследований воздействия размеров и числа лежней на деформационную и прочностную устойчивость опор, работающих на горизонтальную нагрузку, при перемене высоты приложения нагрузки на основе разработанных расчетных методов в сопоставлении с данными экспериментальных исследований.

6) Анализ и обобщение результатов выполненных исследований.

7) Разработка рекомендаций по технико-экономическому обоснованию оптимальных размеров лежней в соотношении их с размерами опоры, работающей на горизонтальную нагрузку, и затрат материала на изготовление лежней.

**Объектом исследований** являются горизонтально нагруженные опоры контактных сетей и линий электропередачи.

**Предметом исследований** являются: напряженно-деформированное состояние фундаментов опор, воспринимающих горизонтальную нагрузку, с применением лежней в зависимости от геометрических размеров, количества и высоты приложения нагрузки; распределения контактных давлений по поверхности лежней и ствола подземной части опоры при действии горизонтальной нагрузки.

**Научная новизна работы.**

1. Экспериментальные и теоретические исследования показали действительную *эффективность* использования лежней, которая заключается в уменьшении горизонтальных смещений и увеличении несущей способности опоры с одним верхним лежнем в среднем более чем в 1,3, а с двумя – до 1,77 раза по сравнению с ординарной опорой.

2. Экспериментально установлено, что с увеличением нагрузки конфигурация эпюры контактных напряжений по длине лежней изменяется незначительно и от слабой вогнутости при начальной нагрузке в дальнейшем переходит в форму, близкую к прямолинейной. Поэтому в расчетной модели эпюры по длине лежней приняты в *виде равномерно распределенных нагрузок* для каждой ступени нагружения.

3. Контактные напряжения, развивающиеся по фронтальной поверхности ствола опытной опоры, имеют вид знакопеременной ступенчатой или линейной эпюры, соответствующей работе *изгибаемой жесткой балки на упругом основании*, с постоянным по глубине коэффициентом постели.

4. По величинам перемещений упругой линии подземной части опоры и соответствующих им контактным напряжениям с использованием зависимости Винклера вычислены соответствующие им уникальные опытные величины *коэффициента постели грунта*.

5. Установлено, что величина сил трения по боковым граням до их «срыва» составляет до 50% и более от общего сопротивления горизонтально нагруженной опоры, а затем она снижается. После *полной реализации сил трения* их величина в абсолютных величинах в дальнейшем остается примерно постоянной.

6. При разработке метода расчета горизонтально нагруженной *опоры с лежнями* по прочности и деформациям с учетом полученных опытных данных она рассматривается как вдавливаемая и одновременно поворачиваемая жесткая балка со *сложной геометрией* на винклеровском основании с двумя коэффициентами постели.

7. Расчетные значения коэффициента постели рекомендуется определять: при *вдавливании* балки через модуль общей деформации грунтов с использованием формулы Шлейхера для осадки штампа, а при *ее повороте* от моментной нагрузки – зависимости К.Е.Егорова.

8. Проведенные экспериментальные исследования позволили наряду с полученной *реальной* картиной влияния лежней на деформационную и несущую способность одностоечных опор, работающих на горизонтальную нагрузку, получить *натурные данные* для оценки и корректировки разработанных методов их расчета.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в получении новых экспериментальных данных взаимодействия горизонтально нагруженных опор, оснащенных одним и двумя лежнями, с окружающим грунтом при изменении высоты и величины прилагаемой нагрузки и изменения относительных размеров лежней и опоры. Они необходимы для обоснования выбора расчетной модели и разработки практических методов расчета фундаментов опор ЛЭП и контактных сетей, оснащенных лежнями-ригелями на горизонтальную нагрузку. Кроме того:

1. Поставлена и, на основании полученных экспериментальных данных, решена задача теоретического расчета по прочности и деформациям горизонтально нагруженной опоры с лежнями как жесткой балки со *сложной геометрией* с двумя коэффициентами постели, имеющими постоянные значения по глубине. Сопротивлением песчано-гравийной подсыпки, устраиваемой вокруг опоры, пренебрегается в запас прочности из-за ее нерегулярности.

2. Показано, что при расчете коэффициента постели при *вдавливании* через модуль общей деформации грунтов с использованием формулы Шлейхера для осадки штампа, а при ее повороте от *моментной* нагрузки – по зависимости К.Е.Егорова, обобщенное его значение вполне согласуется с величиной, полученной на основе проведенных тензометрических и деформационных исследований.

3. Показано, что без учета сопротивления сил трения по боковым граням опоры имеются расхождения между опытными и расчетными значениями, особенно заметные при усилиях до «срыва» сил трения, а также когда величина нагрузки приближается к критической. С учетом сил трения по боковым поверхностям сходимость между ними в диапазоне нормативных нагрузок вполне удовлетворительная. В практических расчетах силами трения, действующими по боковым граням фундаментной опоры, вполне можно пренебречь в запас прочности конструкции.

4. Установлено, что при увеличении высоты приложения нагрузки над уровнем дневной поверхности, горизонтальные перемещения опоры и ее крен также увеличиваются, а

несущая способность снижается. При этом использование лежней в фундаментах весьма эффективно влияет на снижение деформаций опор, работающих на горизонтальную нагрузку. Наиболее эффективно применение лежней отмечается при размерах длины лежня до  $(3,0 \dots 5,0) d$ , где  $d$  – ширина (диаметр) опоры. Увеличение длины лежня более чем  $5,0 d$  малоэффективно с точки зрения зависимости затрат материалов на его изготовление.

5. Эффективность использования лежней с целью снижения смещений и кренов одностоечных опор более ощутима в случаях приложения горизонтальной нагрузки на большой высоте от уровня поверхности грунта. Это обстоятельство подтверждает экономическую и эксплуатационную целесообразность использования лежней для увеличения деформационной устойчивости одностоечных опор линий электропередач и контактной сети, так как их особенностью является работа на горизонтальную и моментную нагрузку, возникающую от веса проводов и технологического оборудования, расположенных на значительном уровне от поверхности грунта.

6. Показано, что с увеличением толщины лежня постоянной длины смещения опоры на уровне дневной поверхности грунта от горизонтальной и моментной составляющих нагрузки несколько уменьшаются. При этом рост затрат на материал для использования лежней не превышает эффекта, получаемого от снижения деформаций опоры с лежнем по сравнению с вариантом без лежня.

7. Отмечается, что перемещения опоры с двумя лежнями, работающей на горизонтальную нагрузку при одинаковых условиях, уменьшаются по сравнению с опорами с применением одного и без использования лежней. Такой же эффект лежни оказывают и на угол поворота (крен) опоры. С технико-экономической точки зрения наиболее целесообразно применять лежни длиной  $B=3,0d$ , где  $d$  – диаметр опоры. При большей длине лежней эффективность их применения снижается.

8. Показано, что коэффициент возрастания несущей способности одностоечной опоры с применением двух лежней и без лежней по отношению к затратам материала на их изготовление существенно больше единицы. Применение двух лежней с целью увеличения несущей способности опоры является более эффективным по сравнению с одним лежнем с точки зрения относительно меньших затрат материалов на их изготовление.

9. Показано, что возрастание несущей способности опоры, работающей на горизонтальную нагрузку, при увеличении длины лежня дает больший эффект, чем при увеличении его толщины. Даны рекомендации по оптимальному назначению размеров и числа лежней, исходя из технико-экономического эффекта от их применения, т.е. по соотношению «деформационная и несущая способность – расход материала».



**Методология и методы исследования.** При планировании экспериментов и назначении размеров моделей горизонтально нагруженных опор использовалась теория механического подобия 2-х упругих систем. Этими системами и являются опоры, которые взаимодействуют с упругим основанием, на основе такого параметра как *показатель гибкости*, являющегося безразмерным. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием методов математической статистики.

При разработке методов расчета горизонтально нагруженных опор с лежнями использовались основные уравнения теории балок на упругом основании, статики сооружений и механики деформируемого твердого тела. В аналитических и численных исследованиях использовались MathCad и Plaxis 3D.

**Личный вклад автора:**

– организация и проведение в полевых условиях всего комплекса полевых испытаний крупноразмерных моделей горизонтально нагруженных опор как ординарных, так и усиленных лежневыми конструкциями с применением тензометрии;

– анализ полученных результатов и сопоставительный расчет в программном продукте Plaxis 3D;

– разработка метода расчета горизонтально нагруженных опор, усиленных лежневыми конструкциями по двум группам предельных состояний.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты проведенных *полевых* испытаний горизонтально нагруженных крупногабаритных моделей опор ЛЭП и контактных сетей как ординарных, так и усиленных лежневыми конструкциями, позволившими выявить реальную картину их взаимодействия с грунтовым основанием и степень повышения их деформационной и несущей способности.

2. Разработанные автором теоретические методы расчета опор, работающих на горизонтальную нагрузку и усиленных лежнями по двум группам предельных состояний, а также результаты аналитических исследований их эффективности в зависимости от числа, геометрических размеров и высоты приложения горизонтальной нагрузки.

3. Практические рекомендации по назначению оптимальных размеров, количества и места установки лежней для опор линий электропередач и контактных сетей, работающих на горизонтальную нагрузку.

**Достоверность полученных результатов** основана на использовании апробированных и стандартных методик полевых испытаний опор на горизонтальную нагрузку и применении основных положений строительной механики балок на упругом

основании, моделей классической механики деформируемого твердого тела, а также механики грунтов.

**Апробация работы.** Материалы работы были доложены на ряде международных конференций, таких как международная научно-практическая конференция «Новая наука: опыт, традиции, инновации» (г.Стерлитамак, 24 декабря 2015 г); IV международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки» (г. Санкт-Петербург, 29 декабря 2015); международная научно-практическая конференция «Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития» (г. Киров, 23 февраля 2016 г.).

**Внедрение результатов.** Разработанные рекомендации и методика расчета использовалась при проектировании и строительстве (реконструкции) зданий и сооружений, расположенных в Московской («Реконструкция корпуса 32», г.Рошаль) и Рязанской областях (Модернизация МБУК «КДЦ «Октябрь», г.Рязань).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 работ (автора – 1,98 пл.), отражающих основные научные результаты диссертации в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий. Из них 3 работы (автора – 1,37 пл.) из перечня, рекомендуемого ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, основных выводов, списка использованной литературы (147 наименований) и содержит 158 страниц машинописного текста, 59 рисунков и 31 таблицу.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационных исследований, определены цели и основные задачи исследований, отмечается научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** дается анализ работ, посвященных практическому применению, а также экспериментальным и теоретическим исследованиям горизонтально нагруженных опор с лежащими и взаимодействию их с грунтовым основанием. Дана краткая характеристика применяемых конструкций опор контактной сети на транспорте и линиях электропередач.

При расчете фундамента все виды нагрузок, воспринимаемых надземной частью опоры, приводятся к суммарному моменту, горизонтальной и вертикальной силам, приложенным к опоре у поверхности грунта. Важной задачей при прокладке воздушных высоковольтных линий электропередач является обеспечение общей устойчивости железобетонных опор ЛЭП и контактной сети, особенно при диаметрах от 560 до 800 мм, обладающих высокой парусностью

под воздействием ветровой нагрузки. Устойчивость опор обеспечивается степенью их закрепления в грунте, что особенно актуально при использовании одностоечных опор ЛЭП и контактной сети. Для повышения деформационной и несущей способности, а также надежности одностоечных опор используются ригели (лежни) различных конструктивных решений, увеличивающие площадь боковой поверхности фундаментов, работающих на горизонтальную нагрузку.

Отмечается, что, несмотря на практическую важность рассматриваемой задачи, подтверждаемую широким применением ригелей (лежней) при возведении опор ЛЭП и контактных сетей, результатов экспериментальных исследований в этом направлении в литературе опубликовано недостаточно. Имеются лишь единичные исследования на моделях влияния кольцевых плит, установленных в верхней сдвигаемой зоне грунта, на деформационную и несущую способность горизонтально нагруженных свай (А.А. Бакулина).

Методы расчета опор с лежнями базируются в основном на результатах экспериментальных и теоретических исследований, проведенных с одиночными сваями на горизонтальную нагрузку как у нас в стране, так и за рубежом. Наиболее известны в этой области работы: Абелева М.Ю., Ангельского Д.В., Архангельского М. М., Березанцева В. Г. , Буданова В.Г. Буслова А.С., Голубкова В.Н., Готмана А. Л., Жемочкина Б.Н., Знаменского В.В., Казарновского В.С., Кудрина С.М., Лалетина Н.В., Миронова В. В., Разоренова И.Ф., Снитко Н.К., Тер-Мартirosяна З.Г., Федоровского В.Г., Шахирева В. Б., Broms B. V., Matlock Reese, Miche R., Palmer L.A. and Thompson J.B., Pan, J. L., Goh, A.T.C., Wong, K.S. and Teh, C. I. Feagin L.V., Hetenyi M. и ряда других. Они служат основополагающей базой для дальнейших исследований в этой области.

Метод расчета горизонтально нагруженных опор с применением различного рода лежневых конструкций в виде отдельных балок, брусков и т.п., устраиваемых со стороны противоположной действующей нагрузке или моменту, приведен в ряде отечественных нормативных документов. В то же время необходимое подкрепление расчетных методов экспериментальными данными в случае усиления горизонтально нагруженных опор лежнями и анализ их эффективности в зависимости от размеров и количества лежней в литературе отсутствует.

Все это предопределило цель и задачи дальнейших исследований, сформулированных в заключение первой главы диссертации.

**Во второй главе** приводятся результаты экспериментальных исследований деформационной и несущей способности горизонтально нагруженных опор с лежнями. С целью оценки деформационной и несущей способности горизонтально нагруженных одиночных опор,

усиленных лежнями, были проведены испытания конструкций, моделирующих работу опор в натуральных грунтовых условиях, которые включали два направления.

*Первое направление* посвящено испытанию двух одностоечных опор, одна из которых была без лежня, а другая – с лежнем в верхней сдвигаемой зоне грунта основания. Путем сравнения перемещений было определено влияние лежня на деформационную и несущую способность горизонтально нагруженной одностоечной опоры.

Целью *второго направления* исследований являлось определение влияния места установки, размеров и числа лежней на работу горизонтально нагруженных опор. Испытания проводились с двумя опорами, одна из которых была оснащена двумя лежнями одинаковой длины, а вторая - двумя лежнями различной длины.

Для моделирования работы конструкций в реальных условиях выполнялась откопка шурфов размером 1000x1000x1000 мм. В качестве обратной засыпки применен суглинок. Обратная засыпка производилась слоями толщиной 100 мм с применением ручной трамбовки. В верхней зоне у поверхности грунта устроен слой балласта из гранитного щебня толщиной 100 мм, моделирующий реальные технологические особенности строительства опор ЛЭП и контактной сети на транспорте (рисунок 1).

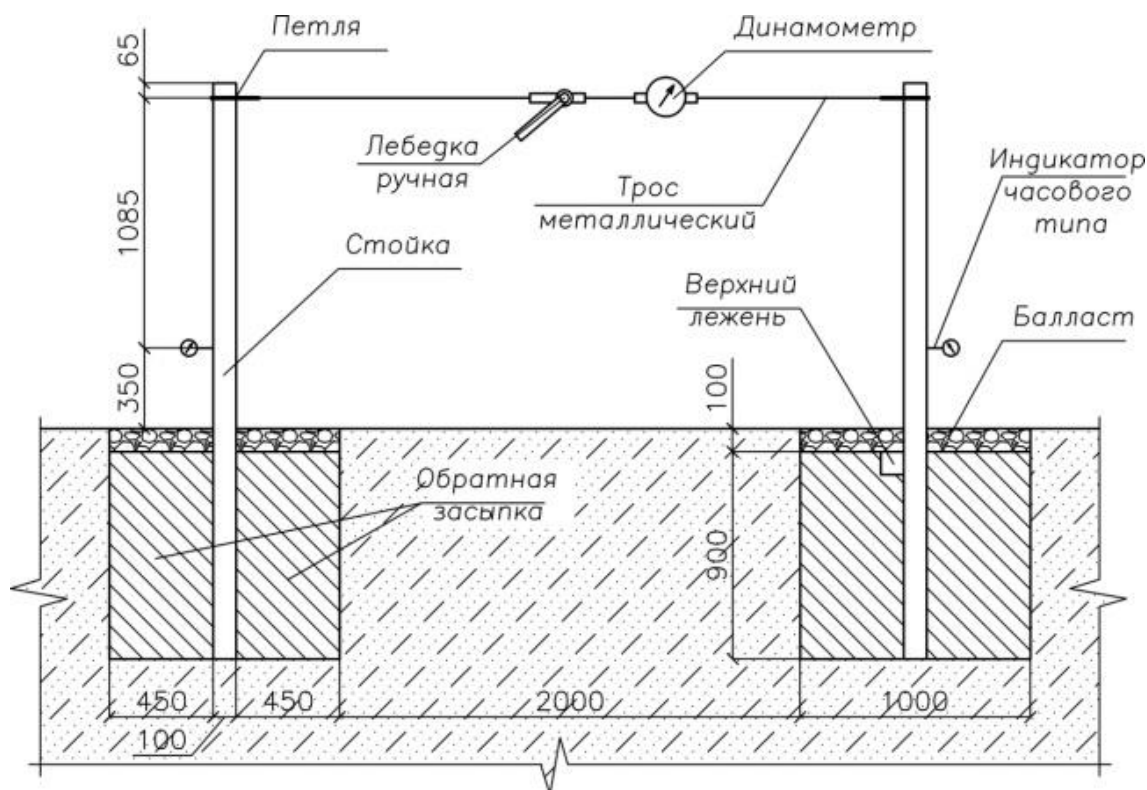


Рисунок 1 – Схема испытаний опор на горизонтальную нагрузку

Для определения контактных давлений, действующих по поверхностям лежней и стойки, вследствие отпора грунта на одной из опор были сконструированы деформационные

элементы – «балочки», оснащенные тензометрическими датчиками. Деформации тензоэлементов под действием реактивного давления грунта регистрировались при помощи автоматического измерителя деформаций (АИД – 4).

Установлено, что в процессе увеличения нагрузки конфигурация эпюр контактных напряжений по длине лежней изменяется незначительно (рисунок 2) и вполне может быть принята в виде *равномерно распределенных нагрузок* для каждой ступени нагрузки.

Показано, что контактные напряжения, развивающиеся по фронтальной поверхности ствола опытной опоры, имеют вид знакопеременной ступенчатой или линейной эпюры, соответствующей работе *изгибаемой жесткой балки на упругом основании* с постоянным по глубине коэффициентом постели (рисунок 3).

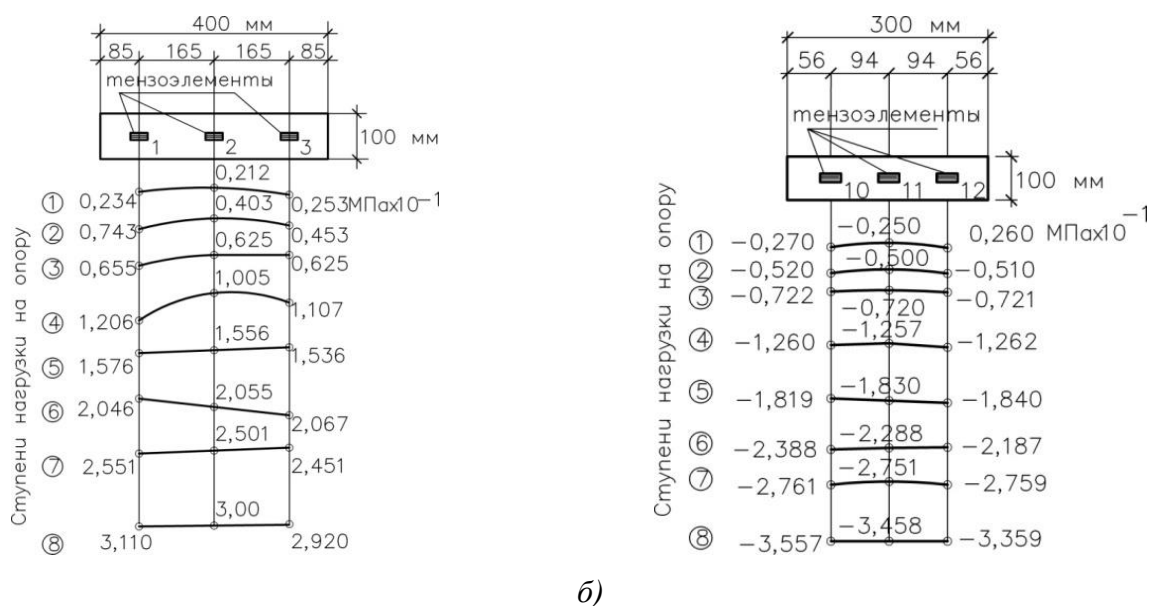


Рисунок 2 – Эпюры контактных напряжений по фронтальной поверхности *верхнего* (а) и *нижнего* (б) лежней в зависимости от величин, действующих на опору горизонтальных нагрузок

По величинам перемещений контура подземной части опоры и соответствующим им контактным напряжениям, используя зависимость Винклера, вычислены *уникальные* значения коэффициентов постели грунта (таблица 1), окружающего опору в местах установки тензоэлементов. По данным экспериментальных исследований определена средневзвешенная величина коэффициента постели  $\bar{k} = \frac{\sum k_{ср} \cdot P_i}{\sum P_i} = \frac{143,466}{28,60} = 50,16 \text{ Н/см}^3$ . Стандартное отклонение (средняя квадратичная ошибка) при этом равна  $\sigma = 8,37$ . Средняя квадратичная ошибка среднего значения:  $\sigma_{\bar{x}} = 2,95$ .

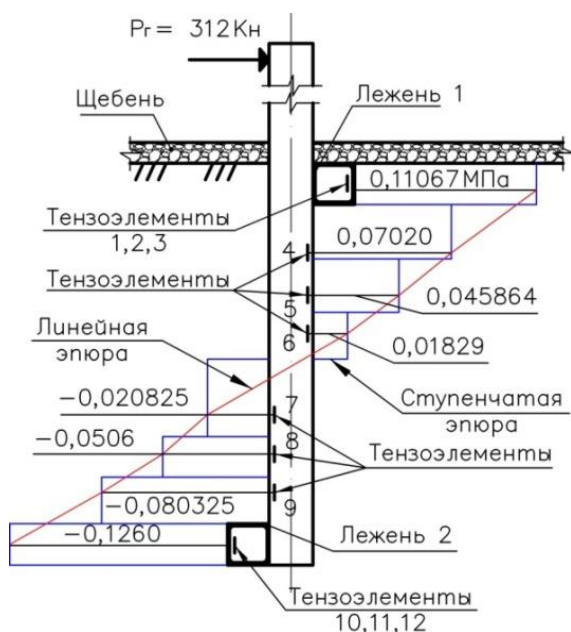


Рисунок 3 – Виды линейной и ступенчатой контактных эпюр для опоры № 4 с двумя лежнями длиной 400 (лежень 1) и 300 мм (лежень 2), при действии горизонтальной нагрузки  $P_r=312$  кН

Определив по эпюре контактных напряжений реактивный момент отпорных сил по разнице между ним и действующим на опору общим моментом от горизонтальной нагрузки, было найдено сопротивление горизонтально нагруженной опоры по боковым ее граням, возникающее за счет сил трения.

Установлено, что доля сил трения до их «срыва» в начале загрузки опоры составляет до 50% и более от общего сопротивления горизонтально нагруженной опоры, а затем она снижается. Показано, что после *полной реализации сил трения* по боковым граням опоры их величина в абсолютных величинах в дальнейшем остается примерно постоянной.

Полевые испытания показали, что для горизонтально нагруженных опор применение лежней *повышает эффективность* их работы, заключающуюся в уменьшении горизонтальных

перемещений и увеличении несущей способности опоры с одним лежнем в среднем более чем в 1,3, а с двумя - до 1,77 раза по сравнению с ординарной опорой.

Таблица 1 – Значения коэффициентов постели, вычисленные по опытным значениям контактных напряжений и перемещениям подземной части опоры с двумя лежнями.

$P_r$ , кН	Значения коэффициента постели $k$ в местах установки тензоэлементов, $\text{Н/см}^3 \times 10^{-1}$								
	Номера тензоэлементов								
	1, 2, 3 Верх. лежень	4	5	6	7	8	9	10, 11, 12 ниж. лежень	$k_{\text{ср}}$
0,88	6,49	6,65	6,55	6,53	6,47	6,35	6,45	6,51	6,50
1,60	6,16	6,20	6,25	6,18	6,27	6,21	6,00	6,30	6,20
2,40	3,74	3,72	3,70	3,64	3,77	3,71	3,62	3,76	3,70
3,12	5,95	5,85	5,88	5,90	5,95	5,75	5,95	6,00	5,90
3,92	5,85	5,70	5,88	5,75	5,80	5,78	5,58	6,10	5,80
4,80	5,71	5,68	5,52	5,41	5,72	5,66	5,86	5,72	5,66
5,48	4,72	4,63	4,70	4,65	4,55	4,70	4,65	4,60	4,65

**Третья глава** посвящена изложению экспериментального и теоретического обоснования расчетной модели и метода расчета горизонтально нагруженных опор с *лежнями* по второй группе предельных состояний (деформациям).

В соответствии с анализом существующих методов расчета свай на горизонтальную нагрузку и полученных опытных данных контактных напряжений принята расчетная схема по BengtBroms с постоянным по глубине коэффициентом постели по глубине. Деформация фундамента опоры с одним лежнем (рисунок 4) складывается из поступательного горизонтального перемещения от силы  $P_2$  (рисунок 3б), приложенной в центре тяжести «Ц» эпюры реактивного давления (рисунок 3з), а также поворота его под действием момента  $M$  на этом же уровне (рисунок 3в).

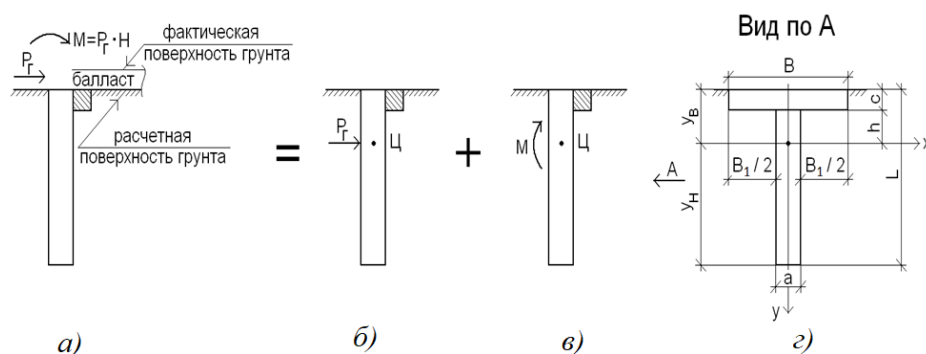


Рисунок 4 – Расчетная схема перемещений горизонтально нагруженного фундамента с лежнями: *а* – схема опоры с лежнем в верхней сжимаемой зоне с приведенными к расчетной поверхности грунта горизонтальной силой и моментом; *б* – перемещение опоры с лежнем под действием силы  $P_2$ , приложенной в центре тяжести эпюры реактивных давлений; *в* – поворот (крен) опоры с лежнем под действием момента горизонтальных сил; *з* – геометрическая форма фронтальной поверхности горизонтально нагруженной опоры с лежнем

Перемещения от силы  $P_2$ , приложенной в центре тяжести эпюры отпора, в соответствии с принимаемой нами для исследований теорией Винклера, определяются зависимостью

$$\Delta_P^z = \frac{P_2}{k[a(L-c) + Bc]} \quad (1)$$

где  $P_2$  – горизонтальная нагрузка;  $k$  – коэффициент постели, принятый постоянным по глубине;  $a$  – ширина фундамента;  $L$  – глубина фундамента;  $c$  – толщина лежня;  $B$  – длина лежня;

Перемещения фундамента со сложной геометрией на Винклеровском основании *под действием момента  $M$*  найдем из зависимости

$$\Delta_M^z = \frac{M}{kW_x} \quad (2)$$

где  $W_x$  – момент сопротивления фронтальной поверхности фундамента с лежнем.

Для общего случая расчета опоры с двумя лежнями, имеющими разные размеры, необходимо учесть дополнительное сопротивление по их плоскостям (рисунок 5).

Моментные нагрузки передаются на поддерживающую опору и ее фундамент через консоли, применяемые для удержания проводов ЛЭП и контактных сетей, Экстремальное значение моментной составляющей нагрузок  $M_{max}^{конс}$ , передающихся через консоли, необходимо учитывать в общем уравнении для расчета суммарных деформаций (перемещения и крены) горизонтально нагруженных опор.

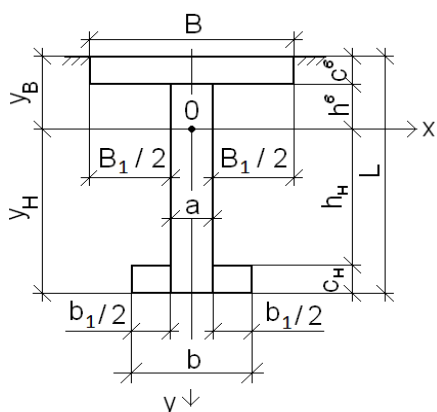


Рисунок 5 – К определению геометрических характеристик горизонтально нагруженной опоры с лежнями *разных* размеров, установленными в верхней и нижней сжимаемых зонах грунта

В общем случае для различных видов грунтов коэффициент постели зависит, как от величины и вида действующей нагрузки, так и от формы и размеров загружаемого штампа. Все это говорит об условности понятия «коэффициента постели», характерного для модели местных упругих деформаций, и необходимости привязки его к общепринятой и апробированной на практике модели линейно-деформируемого полупространства.

В то же время положительным моментом применения самой модели Винклера для решений задач об изгибе балок на упругом основании является значительное упрощение по сравнению с более точными (с теоретической точки зрения) решениями, основанными на применении к грунту модели упругого полупространства.

В связи с этим коэффициент постели для условий вдавливания опоры обычно определяют из зависимости Шлейхера для осадки штампа, наделяя тем самым модель Винклера некоторой распределительной способностью линейно деформируемой среды:

$$k_P = \frac{E_0}{b\omega(1-\mu_0^2)} \quad (3)$$

где  $k_P$  - коэффициент постели грунта для балки, нагруженной силой  $P$ .

При повороте опоры на угол  $\theta$  под действием моментной нагрузки  $M$  для определения коэффициента постели можно воспользоваться решением К.Е.Егорова для крена  $tg\theta$  фундамента прямоугольного сечения  $b$  при действии момента  $M$  вдоль его длины  $L$ :

$$k_M = \frac{6E_0}{\pi(1-\mu_0^2)L} \quad (4)$$



Коэффициент постели при повороте балки под действием момента  $M$  с целью унификации можно выразить через коэффициент постели при вдавливании балки от силы  $P$ , тогда

$$k_M = \alpha k_P \quad (5)$$

где

$$\alpha = \frac{k_M}{k_P} = \frac{6E_0 b \omega (1 - \mu_0^2)}{\pi (1 - \mu_0^2) L E_0} = 1,91 \omega \frac{b}{L} \quad (6)$$

С учетом приведенных формул по определению коэффициента постели грунта (3) (5) аналитические зависимости для расчета деформаций (перемещений и кренов) горизонтально нагруженных опор ЛЭП и контактных сетей с учетом моментной составляющей нагрузок  $M_{max}^{конс}$  будут иметь следующий вид:

а) Суммарные перемещения на уровне условной поверхности грунта ( $H=0$ ):

$$\sum \Delta_z^0 = \frac{P_z}{k_P [b c_n + a (h_n + h_g) + B c_g]} + \frac{3}{2 k_M} \cdot \frac{[P_z (H + y_g) + M_{max}^{конс}] [a L^2 + B_1 c_g^2 + b_1 c_n (2L - c_n)]}{(B y_g^3 - B_1 h_g^3 + b y_n^3 - b_1 h_n^3) (aL + B_1 c_g + b_1 c_n)} \quad (7)$$

б) Крен опоры:

$$tg \theta^M = \frac{3}{k_M} \frac{[P_z (H + y_g) + M_{max}^{конс}]}{(B y_g^3 - B_1 h_g^3 + b y_n^3 - b_1 h_n^3)} \quad (8)$$

в) Перемещения опоры на высоте  $H_i$ :

$$\Delta_{H_i} = \sum \Delta_z^0 + H_i tg \theta^M \quad (9)$$

**В четвертой главе** приведен разработанный автором метод расчета предельной несущей способности горизонтально нагруженной одиночной опоры с лежнями. Предельная несущая способность горизонтально нагруженной жесткой опоры характеризуется большими деформациями с потерей ею устойчивости *по грунту*, т.е. опрокидыванием, либо потерей несущей способности *по материалу* опоры – ее изломом.

Для определения предельной нагрузки на опору с лежнями составляем уравнения равновесия моментов относительно точки « $k$ » (рисунок бб).

Поскольку принята схема с постоянной по глубине величиной предельного сопротивления, то  $\sigma_{c_n}^{ul} = \sigma_{d_g}^{ul} = \sigma_{d_n}^{ul} = \sigma_{c_n}^{ul} = \sigma_{ul}$ .

При этом учитывались следующие полученные экспериментальные данные: характер эпюр отпорных реакций на контакте лежней с грунтом и на контакте фронтальной поверхности фундаментной опоры с грунтом; общий вид эпюры контактных напряжений, представляющий собой сумму составляющих отпоров от действия горизонтальной нагрузки при вдавливании штампа и моментных сил, вызывающих крен фундамента.

В результате аналитического анализа на основе уравнений статики получена следующая зависимость для определения предельной горизонтальной нагрузки на опору:

$$P_{ul} = \frac{\sigma_{ul}}{2(H+L)} \{d(4z_0L - 2z_0^2 - L^2) - [c_\epsilon^2(B-d) + c_n^2(b-d)] + 2c_\epsilon L(B-d)\} \quad (10)$$

где  $z_0$  – точка условного поворота опоры в грунте, определяемая зависимостью:

$$z_0 = 0,5 \left[ L + \frac{c_n}{d} (b-d) - \frac{c_\epsilon}{d} (B-d) \right] \quad (11)$$

$\sigma_{ul}$  – предельная несущая способность грунта при боковом вдавливании штампа.

Остальные параметры представлены на рисунке 6.

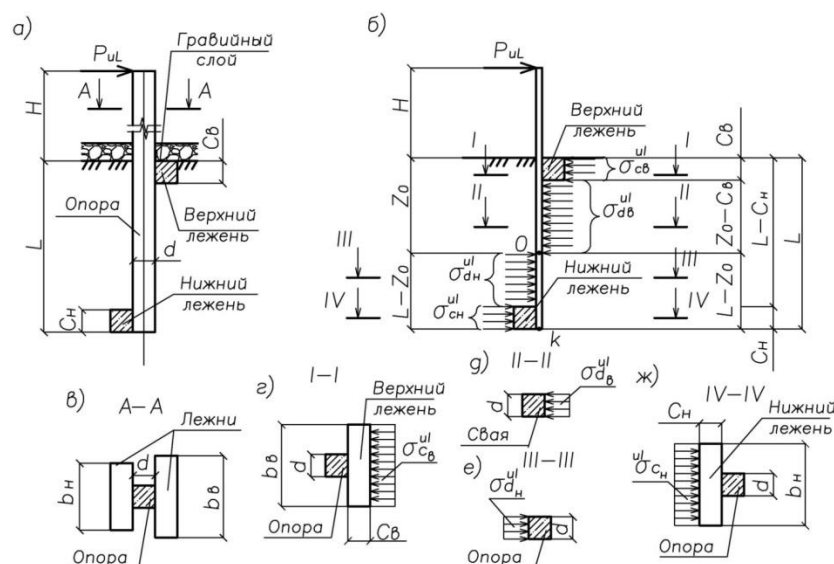


Рисунок 6 – Расчетная схема для определения предельной несущей способности горизонтально нагруженной опоры: а – общий вид опоры с лежнями; б – схема распределения предельных отпорных реакций по боковым поверхностям лежней и ствола опоры по глубине  $L$ ; в – расположение лежней в плане по А-А; г – распределение отпорной реакции в горизонтальном сечении I-I по длине верхнего лежня; д – распределение отпорной реакции по высоте опоры от верхнего лежня до глубины  $Z_0$  в горизонтальном сечении II-II; е – распределение отпорной реакции по высоте опоры от точки условного поворота «О» до нижнего лежня в горизонтальном сечении III-III; ж – распределение отпорной реакции в горизонтальном сечении IV-IV по длине нижнего лежня

В диссертации показано, что суммарный реактивный отпор грунта по лежням не может быть более отпора по стволу самой опоры, в связи с чем даны зависимости для определения оптимального соотношения их размеров.

Не менее важен выбор аналитической зависимости предельного сопротивления грунта при боковом вдавливании опоры, наиболее близко соответствующей опытным данным, имеющимся в литературе. На основании проведенного анализа ряда наиболее известных как

теоретических, так и эмпирических зависимостей отечественных и зарубежных авторов в диссертации была использована полуэмпирическая зависимость вида (А.С. Буслов и др.):

$$\sigma_{ul} = \pi c_0 D \quad (12)$$

где  $c_0$  – коэффициент сцепления грунта;

$D$  – коэффициент, зависящий от угла внутреннего трения и принимаемый на основании статистической обработки многочисленных опытных данных в виде эмпирической зависимости от коэффициента пассивного давления грунта  $D = tg^3 (45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ . Результаты расчетов по формуле (12) практически совпадают с теоретическим решением Прандтля.

**В пятой главе** приводятся результаты аналитических исследований влияния лежней на увеличение деформационной и несущей способности горизонтально нагруженных опор и оценка достоверности полученных результатов путем сравнения их с данными полевых экспериментальных исследований и расчетом в программном продукте Plaxis 3D.

Расчеты по предложенным формулам показали, что без учета сопротивления сил трения, действующих по боковым граням опоры, имеются расхождения между расчетными и опытными данными, особенно заметные при нагрузках до «срыва» сил трения, а также при приближении величин нагрузок к критическому значению. С учетом сил трения по боковым граням сходимость между ними в диапазоне нормативных нагрузок вполне удовлетворительная. В среднем расхождения расчетных (с учетом сил трения) и опытных данных составляют 9,62 %.

В практических расчетах силами трения, действующими по боковым граням фундаментной опоры после «срыва», вполне можно пренебречь в запас прочности конструкции.

Результаты сопоставительного анализа результатов, полученных в соответствии с предложенным автором методом расчета, опытными данными и расчетом в Plaxis 3D, представлены на рисунке 7, из которого видно, что в пределах линейной зависимости, сходимость результатов расчета в программном комплексе Plaxis 3D и аналитическим методом с опытными данными очень близка.

Применение лежней весьма эффективно влияет на уменьшение деформаций горизонтально нагруженных опор. Зависимости между перемещениями опоры, длиной лежня и высотой приложения горизонтальной нагрузки имеют нелинейный характер.

Наиболее эффективно с точки зрения взаимосвязи между уменьшением перемещений и увеличением расхода материала является применение лежней с размерами длины до  $(3,0 \dots 5,0) d$ , где  $d$  – ширина (диаметр) опоры. Дальнейшее увеличение длины лежня малоэффективно с точки зрения зависимости затрат материала.

Поэтому за границей линейной зависимости деформаций от напряжения расхождение с опытными данными увеличивается. Несмотря на это, необходимо отметить, что предложенный в диссертационной работе аналитический метод расчета дает более близкие к опытным данным результаты.

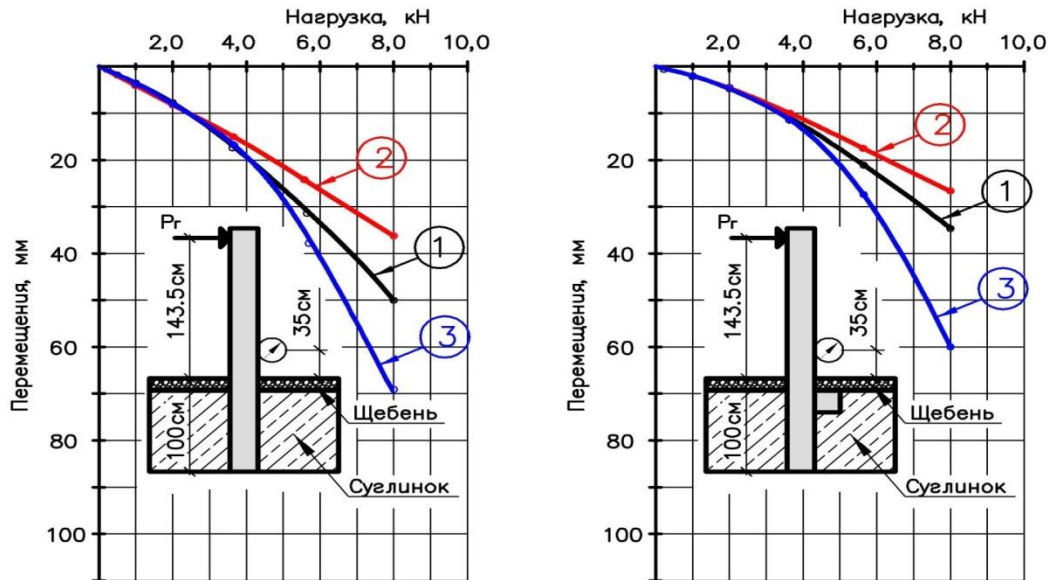


Рисунок 7 – Графики сравнения данных: 1 – по результатам эксперимента; 2 – расчет аналитическим методом; 3 – расчет в Plaxis 3D

Применение двух лежней для повышения несущей способности опоры дает больший эффект по сравнению с одним лежнем с точки зрения расхода материала на их изготовление.

При этом эффективность применения двух лежней по отношению к одному лежню при их длине  $3d$  и  $5d$  увеличивается, а при  $7d$  уменьшается.

С увеличением толщины лежня постоянной длины перемещения опоры на уровне дневной поверхности грунта от горизонтальной и моментной составляющих нагрузки несколько уменьшаются. Наибольший технико-экономический эффект от увеличения толщины лежня наблюдается при ширине лежня  $s_e < 0,2L$ . При этом рост затрат на материал для лежней не превышает эффекта, получаемого от снижения деформаций опоры с лежнем по сравнению с вариантом без лежня.

Эффективность применения лежней для уменьшения перемещений и кренов отдельно стоящих опор наиболее ощутима в случаях, когда горизонтальная нагрузка приложена на значительной высоте над уровнем дневной поверхности. Это обстоятельство подтверждает эксплуатационную и экономическую целесообразность применения лежней для повышения деформационной устойчивости опор ЛЭП и контактной сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение диссертационной работы приведены итоги выполненных исследований. По их результатам сделаны следующие выводы:

1. Изучен и анализирован современный опыт проектирования и строительства опор ЛЭП и контактных сетей с применением балок-ригелей или «лежней», уложенных в грунте перпендикулярно стволу опоры с целью увеличения ее деформационной и несущей способности. Показана актуальность проблемы в свете задач *повышения безопасности*, поставленных стратегиями развития железнодорожного транспорта и электроэнергетики РФ [117], а также необходимостью проведения дальнейших исследований в этой области.

2. Поставлена и решена задача экспериментальным путем оценить действительное влияние лежней в зависимости от их геометрических размеров и числа на деформационную и несущую способность опор, работающих на горизонтальную нагрузку. Основываясь на применении регламентированных методик полевых испытаний опор, измерительной техники и тензометрии получены оригинальные *опытные данные*, необходимые для выбора расчетной схемы и последующего сравнительного анализа их с результатами расчетов.

3. Выбраны расчетные модели опор с лежнями, работающих как балки со *сложной геометрией* на винклеровском основании, моделируемом *двумя коэффициентами* постели, отражающими, соответственно, вдавливание и поворот фундамента под действием горизонтальной нагрузки.

4. Разработаны аналитические методы расчета по прочности и деформациям (перемещения и крен) горизонтально нагруженных опор с лежнями. При расчете по деформациям (перемещения и крен) коэффициенты постели рассчитываются по величине *модуля общей деформации* грунта, исходя из совместных решений зависимости Винклера с решениями, полученными с использованием модели упругого полупространства Шлейхера при вдавливании штампа, а при его повороте - из зависимости К.Е. Егорова.

5. Экспериментальными и аналитическими исследованиями показана действительная *эффективность* использования лежней, которая заключается в уменьшении горизонтальных смещений и возрастании несущей способности опоры с применением одного лежня в среднем более чем в 1,3, а с двумя – до 1,77 раза по сравнению с ординарной опорой.

6. По результатам проведенных аналитических расчетов установлено, что эффективность применения лежней для снижения перемещений (кренов) одиночных горизонтально нагруженных опор наиболее ощутима, когда нагрузка приложена на значительной высоте над уровнем дневной поверхности. Этот вывод *подтверждает* экономическую и эксплуатационную целесообразность использования лежней для увеличения деформационной

устойчивости опор линий электропередач и контактной сети, так как их особенностью является восприятие горизонтальных нагрузок и моментов, возникающих от веса проводов и технологического оборудования на *значительной высоте* от дневной поверхности.

7. Анализ вариантных решения на основе полученных теоретических зависимостей показал, что наиболее эффективно применение лежней при размерах длины лежня до  $(3,0 \dots 5,0) d$ , где  $d$  – ширина (диаметр) опоры. Увеличение длины лежня более чем  $5,0 d$  малоэффективно с точки зрения *затрат материала* на их изготовление.

8. Показано, что утолщение лежня постоянной длины приводит к снижению перемещений опоры от горизонтальной и моментной составляющих нагрузки на уровне дневной поверхности грунта. Наибольший технико-экономический эффект от утолщения лежня прослеживается при ширине лежня  $c_g < 0,2L$ , где  $L$  – длина опоры.

9. Показано, что с учетом сил трения по боковым граням сходимость между опытными и расчетными данными вполне удовлетворительная. Однако в *практических расчетах* по предложенным формулам силами трения, действующими по боковым граням фундаментной опоры, пренебрегается из-за их вариабельности в запас прочности.

В заключение диссертации сформулированы *рекомендации и перспективы* дальнейшей разработки темы:

- расчет длинной горизонтально нагруженной одиночной опоры конечной жесткости, усиленной лежнем;
- расчеты горизонтально нагруженной опоры и лежней по прочности их материалов;
- конструирование и расчет лежневых конструкций (ригели) для фундаментов мощных металлических опор высоковольтных ЛЭП;
- численное моделирование МКЭ перечисленных выше задач.

**Публикации по теме диссертации*****Публикации в изданиях из Перечня ВАК:***

1. **Моховиков, Е.С.** Влияние лежней на перемещения горизонтально нагруженных фундаментов опор контактной сети / А.С. Буслов, Е.С. Моховиков // Вестник МГСУ.–2014.–№8.–С. 44-53,
2. **Моховиков, Е.С.** Несущая способность горизонтально нагруженной одиночной свайной опоры с лежнями / А.С. Буслов, Е.С. Моховиков // Вестник МГСУ.– 2015.–№9.–С.51-60.
3. **Моховиков, Е.С.** Анализ влияния лежней на перемещения и несущую способность горизонтально нагруженных опор ЛЭП и контактной сети по данным экспериментально-теоретических исследований / Е.С. Моховиков, А.С. Буслов// Вестник МГСУ.– 2016.–№10.– С.58-68.

***Публикации в других изданиях:***

4. **Моховиков, Е.С.** Влияние длины лежня и высоты приложения горизонтальной нагрузки на перемещения одностоечной опоры ЛЭП/ А.С. Буслов, Е.С. Моховиков// Международное научное периодическое издание по итогам «Международной научно-практической конференции».–Стерлитамак: РИЦ АМИ.–2015.– Часть 2.–С.153-156.
5. **Моховиков, Е.С.** Деформационно-несущая способность горизонтально нагруженных опор с лежнями/ А.С. Буслов, Е.С. Моховиков//Научный журнал "GLOBUS". IV Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки».–г. Санкт-Петербург.– 2015.– С.103-107.
6. **Моховиков, Е.С.** Экспериментальное определение влияния сил трения по боковым граням горизонтально нагруженной опоры на ее перемещения / Е.С. Моховиков, А.С. Буслов//Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития».–г.Киров: МЦИИ «ОМЕГА САЙНС».– 2016.– Часть 1.– С.36-40.
7. **Моховиков, Е.С.** К вопросу о влиянии поперечного сечения горизонтально нагруженной сваи на суммарные величины бокового отпора и трения грунта /Буслов А.С., Зехниев Ф.Ф., Бакулина А.А., Моховиков Е.С., Монахов И.А. // Вестник НИЦ «Строительство». Геотехника и подземное строительство.– 2017.– № 13.– С.155-166.

Моховиков Евгений Сергеевич

Влияние лежней на перемещения и устойчивость горизонтально нагруженных опор контактных  
сетей и линий электропередачи

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук