

*На правах рукописи*

**НАУМОВ ВАСИЛИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
НАСЫПЕЙ НА УЧАСТКАХ ОБРАЩЕНИЯ ПОЕЗДОВ С  
ПОВЫШЕННЫМИ ОСЕВЫМИ НАГРУЗКАМИ**

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и  
проектирование железных дорог

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)) на кафедре «Путь и путевое хозяйство»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Виноградов Валентин Васильевич

Официальные оппоненты: Блажко Людмила Сергеевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»  
Третьяков Василий Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится « 18 » апреля 2013 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.005.11 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9, МИИТ, ауд. 1235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



А.Н. Савин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года (Стратегия-2030) предусматривает существенное увеличение объемов грузооборота на железнодорожном транспорте к 2015г. (на 40-45%), на отдельных участках, за счёт увеличения весовых норм вагонов, в ряде случаев приводящих к увеличению осевых нагрузок. Опыт эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками показал, что земляное полотно подвержено образованию дефектов и деформаций в зоне основной площадки и откосов.

Существующие методики не в полной мере позволяют комплексно оценивать состояние насыпей, подверженных воздействию поездов с повышенными осевыми нагрузками и требуются исследования для их совершенствования.

**Цель работы.** Целью данной диссертационной работы является разработка методики оценки и способов обеспечения работоспособности земляного полотна железных дорог на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выявлена особенность и закономерность влияния поездов с повышенными осевыми нагрузками на земляное полотно;
2. Разработана методика оценки работоспособности насыпей на участках эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками;
3. Проведены экспериментальные исследования разработанной методики;
4. По разработанной методике:
  - получены типичные характеристики насыпей по геометрии и сложению грунтами для участков обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками на полигоне Московской железной дороги;
  - установлена сфера применения групповых решений насыпей из глинистых грунтов на новых линиях при повышенных осевых нагрузках;
  - определена характеристика эксплуатируемых насыпей, требующих усиления при введении движения поездов с повышенными осевыми нагрузками, как по условию несущей способности, так и по условию устойчивости;

- получена зависимость снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток при усилении одним и двумя слоями геосинтетика.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач выполнялись экспериментально-теоретические исследования.

Для анализа свойств грунтов на исследуемом участке, использовалась база данных по грунтам, сформированная в МГУПС (МИИТ). При лабораторных испытаниях грунтов, применялся комплекс измерительно-вычислительный АСИС.

Экспериментальные исследования методики работоспособности насыпи проводились методом физического моделирования на центробежной установке МГУПС (МИИТ).

Для оценки работоспособности насыпи по несущей способности, использовался метод предельного равновесия, а также метод конечных элементов с применением комплекса Plaxis.

#### **Степень достоверности научных результатов.**

Степень достоверности полученных научных результатов подтверждается выполненными экспериментами на центрифуге и численным моделированием по сертифицированной программе.

**Научная новизна работы** заключается в следующих основных результатах:

1. Разработана методика оценки работоспособности насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками;
2. Для условий участков обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками на полигоне Московской железной дороги получены типичные характеристики насыпей по геометрии и сложению грунтами;
3. Определена сфера применения групповых решений насыпей из глинистых грунтов на новых линиях при повышенных осевых нагрузках и найдены характеристики эксплуатируемых насыпей, требующих усиления при введении движения поездов с повышенными осевыми нагрузками, как по условию несущей способности, так и по условию устойчивости;
4. Получены зависимости снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток при усилении одним и двумя слоями геосинтетика.

### **Практическая ценность диссертации:**

Заключается в применении разработанной методики для проектирования земляного полотна в условиях обращения поездов с повышенными нагрузками как новых линий, так и участков существующих линий, а также оценке состояния эксплуатируемых насыпей при введении обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

Важными для практики являются результаты исследования работоспособности насыпей из глинистых грунтов в зависимости от осевой нагрузки, их геометрических параметров и состояния грунтов.

Использовании рекомендаций по выбору осевой жесткости и количества слоев георешеток для усиления основной площадки насыпей на полигоне Московской железной дороги (Вековка – Бекасово – Смоленск) и варианта повышения устойчивости откосов насыпей за счет применения отсева щебня сухой магнитной сепарации.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- Результаты анализа состояния насыпей на участке обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками;
- Результаты анализа характеристик насыпей по геометрии и сложению грунтами для участков обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками на полигоне Московской железной дороги;
- Методика оценки работоспособности насыпей, на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками;
- Результаты экспериментальных исследований методики оценки работоспособности насыпи;
- Результаты исследования работоспособности насыпей из глинистых грунтов в зависимости от осевой нагрузки, их геометрических параметров и состояния грунтов на полигоне Московской железной дороги (Вековка – Бекасово – Смоленск);
- Результаты исследований по применению групповых решений насыпей из глинистых грунтов на новых линиях при повышенных осевых нагрузках;
- Результаты зависимости снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: заседаниях кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТа (2007-2012гг.); на научно-практической конференции Неделя науки-2008 «Наука МИИТа – ТРАНСПОРТУ» (Москва, МИИТ, 2008 г.); V ежегодная научно-практическая конференция молодых

специалистов «Инженерные изыскания в строительстве – 2009» (Москва, ОАО «ПНИИИС, 2009 г.); на Международной научно-технической конференции «Проблемы механики наземного транспорта» (Днепропетровск, ДИИТ, 2009 г.); на V и VII научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (Москва, МИИТ, 2008, 2010 гг.); 7-я Международная конференция по физическому моделированию в геотехнике 2010 (Швейцария, Цюрих, ETH Campus Science City, 2010 г.).

**Публикации.** Основные положения работы опубликованы в 7 статьях, из них 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, приложений. Общий объем составляет 165 страниц.

### **Основное содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулирована цель и задачи исследования.

**В первой главе** проведён анализ исследований оценки состояния земляного полотна, в т.ч. при воздействии поездов с повышенными осевыми нагрузками. Этим исследованиям посвящены труды многих учёных: Шахунянц Г.М., Яковлева Т.Г., Коншин Г.Г., Виноградов В.В., Титов В.П., Прокудин И.В., Иванов А.Г., Берестяный Ю.Б., Пупатенко В.В., Фроловский Ю.К., Дыдышко П.И., Левинзон М.А., Ашпиз Е.С., Стоянович Г.М., Блажко Л.С., Смолин Ю.П., Зайцев А.А., Третьяков В.В., Козлов И.С. и др.

На основе анализа было установлено, что на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, земляное полотно подвержено образованию дефектов и деформаций в зоне основной площадки и откосов. В связи с этим, выполнен анализ современного и перспективного полигона обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками со следующими величинами осевых нагрузок вагонов: 23 тс/ось – обычные условия; 25 тс/ось – новые вагоны; 27 тс/ось – новые вагоны специализированные; 30 тс/ось – осевая нагрузка вагонов на перспективу.

На основе анализа информации, как один из участков освоения перспективного обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, был выделен участок между станциями Вековка – Бекасово – Смоленск

большого Московского окружного кольца (БМО), который в соответствии с параметром осреднённой грузонапряжённости (более 90 млн.т.км.бр/км в год) участок характеризуется как особогрузонапряженный.

В связи с этим был произведён анализ эксплуатационных данных для составления распределения осевых нагрузок на рассматриваемом участке.

По обработке эксплуатационных данных установлено, что на участке БМО обращаются 16% поездов с осевой нагрузкой более 23 тс/ось от общего количества грузовых поездов (рис. 1). В связи с этим, был проведён анализ состояния насыпей на исследуемом участке.

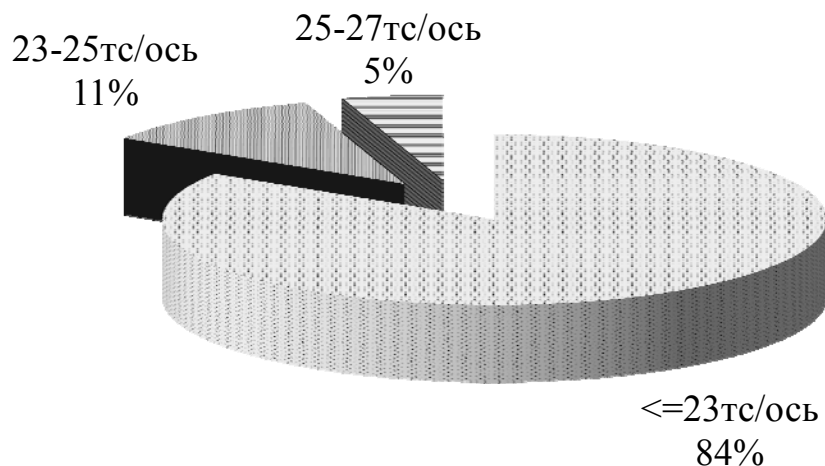


Рисунок 1 – Распределение осевых нагрузок на исследуемом участке БМО

В соответствии с анализом состояния насыпей на исследуемом участке, дефекты и деформации имеют место, как на основной площадке (потеря несущей способности), так и на откосе насыпи (потеря устойчивости откоса), что характерно для участков с эксплуатацией поездов с повышенными осевыми нагрузками.

На основании этого было принято решение провести оценку работоспособности насыпей как подверженных деформациям (числящиеся в карточках ПУ-9), так и на всём участке. Выполнен анализ геометрических параметров насыпей, сложения грунтов насыпей и их физико-механические характеристики, для дальнейшего составления обобщенного эксплуатационного поперечного профиля насыпи на исследуемом участке.

Ранжирование насыпей по высоте, позволило установить, что насыпи высотой более 12 метров составляют 1,5%, от 12 до 6 метров – 6,2%. При этом преобладают насыпи высотой менее 6 метров имеют протяженность 189,2 км или 92,3% от рассматриваемого участка. Соответственно, для дальнейшей оценки состояния эксплуатационных поперечных профилей

были приняты высоты насыпей до 6 метров включительно. При этом крутизна откоса была принята для оценки работоспособности насыпей по устойчивости  $m=2,00$ ;  $m=1,75$ ;  $m=1,50$ , по несущей способности основной площадки, были приняты дополнительные значения крутизны откоса насыпи  $m=1,25$ ;  $m=1,00$ .

Исследование физико-механических свойств грунтов насыпей проводились на основании разработанной на кафедре «Путь и путевое хозяйство» МГУПС (МИИТ) базы данных INFCARD (база данных по объектам эксплуатируемого земляного полотна и грунтам), где были выделены грунты насыпей для исследуемого участка.

Из имеющейся базы данных по грунтам, было установлено, что в основном земляное полотно отсыпано глинистыми грунтами (около 70%). Верхние слои насыпей слагают пески (около 30 %), средняя мощность которых составляет 1 метр. Для глинистых грунтов проводился спектральный анализ по числу пластичности  $I_P$  и показателю текучести  $I_L$  грунта (рис. 2).

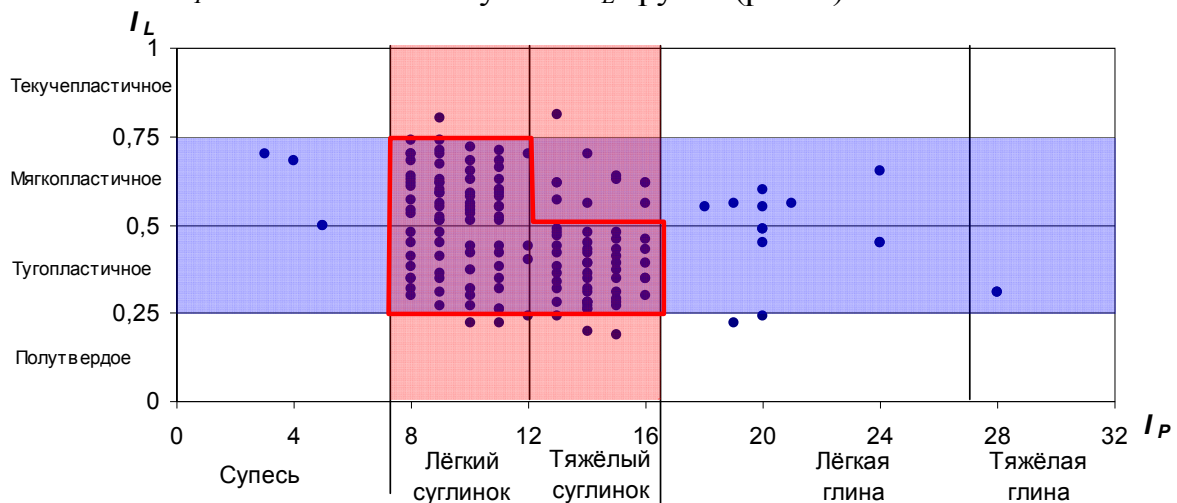


Рисунок 2 – Поле фактических значений числа пластичности  $I_P$  и показателя текучести  $I_L$  грунтов обследованных насыпей

На основании проведенного спектрального анализа глинистых грунтов по числу пластичности и показателю текучести, было установлено, что наиболее распространёнными грунтами являются лёгкие суглинки тугопластичного и мягкопластичного состояния, а также тяжёлые суглинки тугопластичного состояния. Физико-механические характеристики грунтов в зависимости от показателя текучести приведены на рисунке 3. Данные грунты в дальнейшем принимались для оценки работоспособности насыпи на исследуемом участке обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

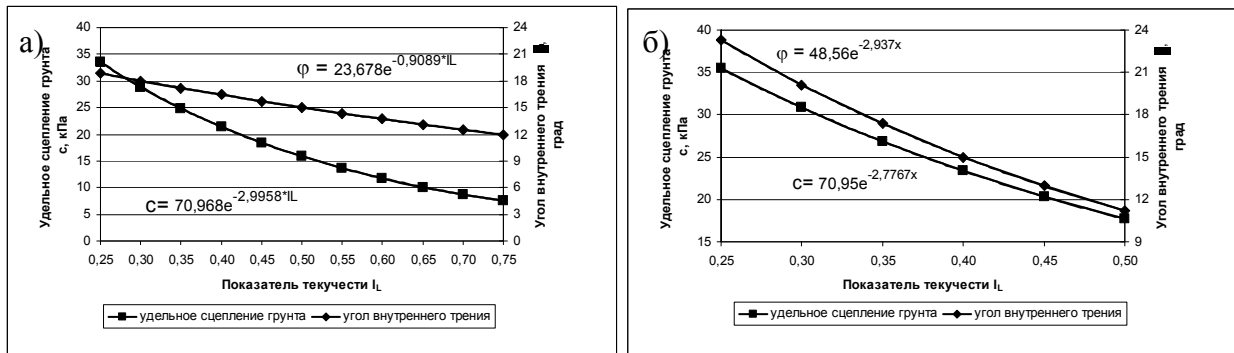


Рисунок 3 – Зависимости прочностных характеристик грунтов от показателя текучести для лёгкого (а) и тяжёлого (б) суглинков

С учетом проведенного анализа геометрических параметров насыпей и физико-механических характеристик грунта слагающих насыпь, был получен обобщенный поперечный профиль для эксплуатируемой насыпи – рисунок 4.

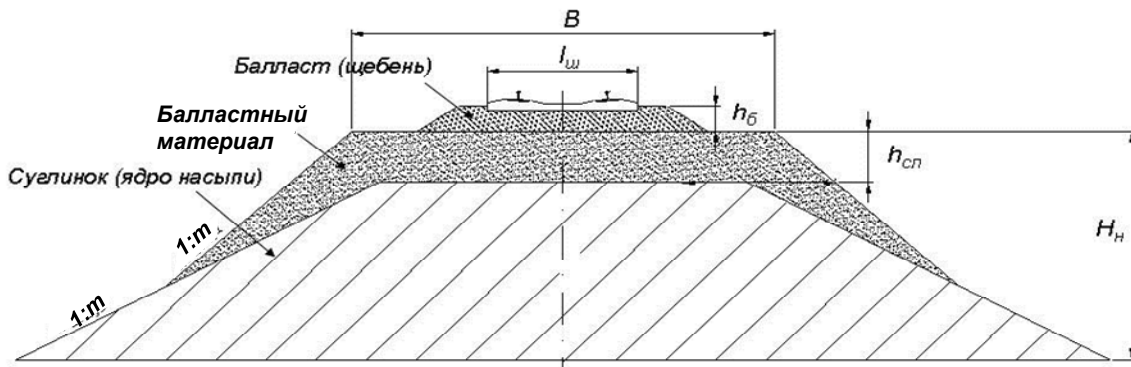


Рисунок 4 – Характерный поперечный профиль эксплуатируемой насыпи

Для определения напряжений на основную площадку насыпи были проанализированы скорости движения грузовых поездов по выбранному участку, на котором средняя скорость составила  $V=45$  км/ч. Напряжения от поезда на основной площадке были определены (по методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности) для тележки ЦНИИ-ХЗ с различными осевыми нагрузками и скоростью движения 45 км/ч. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Напряжения на основной площадке насыпи

| Напряжения на основной площадке насыпи $\sigma$ , кПа при различных осевых нагрузках вагона $P$ , тс/ось |    |    |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| $P$ , тс/ось                                                                                             | 23 | 25 | 27 | 30 |
| $\sigma$ , кПа                                                                                           | 73 | 79 | 86 | 95 |

По результатам исследований изложенных в первой главе определены обобщенные характеристики насыпей по геометрии и сложению грунтами для участков обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками на

полигоне Московской железной дороги для дальнейшей их оценки работоспособности.

Для комплексной оценки состояния насыпей (оценка несущей способности основной площадки и устойчивости откосов насыпи) следует разработать методику оценки работоспособности насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

**Во второй главе** представлены основные положения методики оценки работоспособности насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, а также экспериментальные исследования.

Методика заключается в оценке состояния земляного полотна (насыпей) с разработкой обоснованных технических решений, обеспечивающих его работоспособность.

Интегрально, оценка работоспособности насыпи на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками представляется в виде:

$$K_p = \{(K_n) \wedge (K_y)\} \quad (1)$$

где:

$$K_n = f(c; \varphi; \gamma; m; P) > [K_n]$$

$$K_y = f(c; \varphi; \gamma; m; H; P) \geq [K_y]$$

$K_p$  – коэффициент работоспособности земляного полотна;

$K_n$  и  $K_y$  – расчетные коэффициенты несущей способности основной площадки и коэффициента устойчивости насыпи;

$[K_n]$  и  $[K_y]$  – допускаемые величины коэффициента несущей способности основной площадки и коэффициента устойчивости насыпи.

Блок схема определения работоспособности насыпи представлен на рисунке 5.

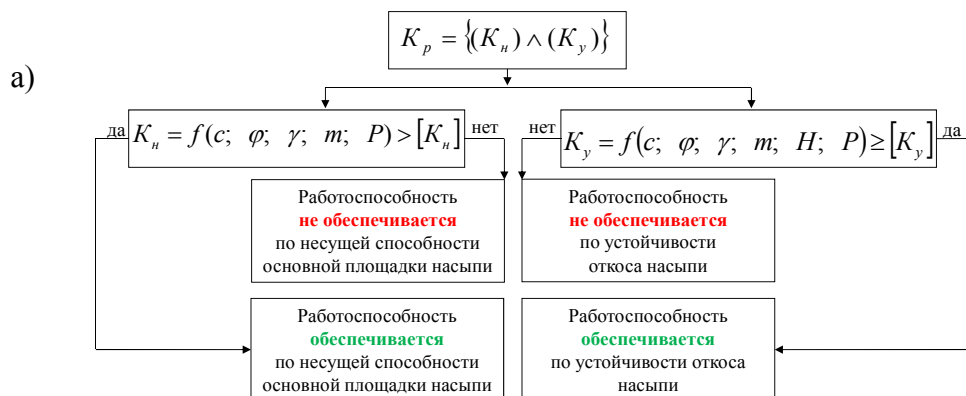


Рисунок 5 – Блок-схема а) оценка работоспособности насыпи;

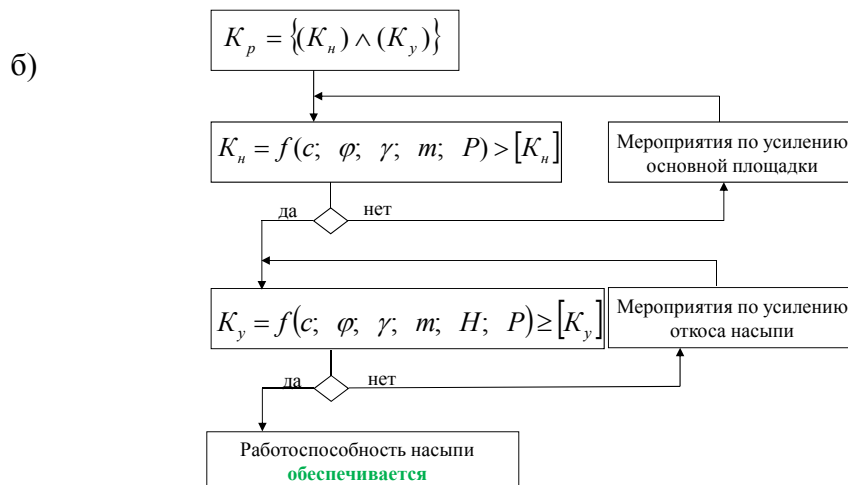


Рисунок 5 – Блок-схема б) обеспечение работоспособности насыпи

Работоспособность насыпи будет обеспечена при выполнении ряда условий, в т.ч. превышения расчетного коэффициента несущей способности насыпи ( $K_n$ ) и коэффициента устойчивости откосов ( $K_y$ ), над соответствующими допускаемыми коэффициентами  $[K_n]$  и  $[K_y]$ .

Предложенная методика оценки работоспособности насыпи, позволяет использовать различные методы для определения несущей способности основной площадки и устойчивости откоса насыпи.

На основе анализа существующих методов определения несущей способности основной площадки насыпи, была выбран метод предельного равновесия позволяющий определить критическую поверхность выклинивания на откосе в верхней части насыпи (в виде логарифмической спирали). Для оценки работоспособности насыпи по устойчивости откоса был принят метод Шахунянца для круглоцилиндрической поверхности смещения откоса.

Для отработки методики оценки работоспособности насыпи, а также проверки работы методики несущей способности, был проведен эксперимент – физическое моделирование с применением геотехнической центробежной установки МГУПС (МИИТ). При сооружении модели насыпи отбирались пробы грунта, на основании которого были определены физико-механические характеристики грунта суглинок 1 и суглинок 2 (рис. 6).

Для визуализации деформаций модели насыпи, в поперечном сечении были установлены маркеры (см. рисунок 6). Моделирование проходило в три этапа. На первом этапе сооружалась модель насыпи и проводился эксперимент с статической нагрузкой интенсивностью 30 кПа, на втором и

третьем этапе проводилось увеличение статической нагрузки, интенсивность нагрузки составила 50 и 115 кПа соответственно. Статическая экспериментальная нагрузка 115 кПа аналогична поезду с осевой нагрузкой 30 тс/ось.

До и после моделирования проводилась съемка поперечного профиля насыпи в трёх сечениях (по краям и середине насыпи), для фиксации деформаций насыпи.

Результаты моделирования приведены в таблице 2.

Исходя из анализа деформаций в процессе моделирования, можно констатировать, что потеря несущей способности насыпи произошла при статической нагрузке интенсивностью 115 кПа (рис. 7).

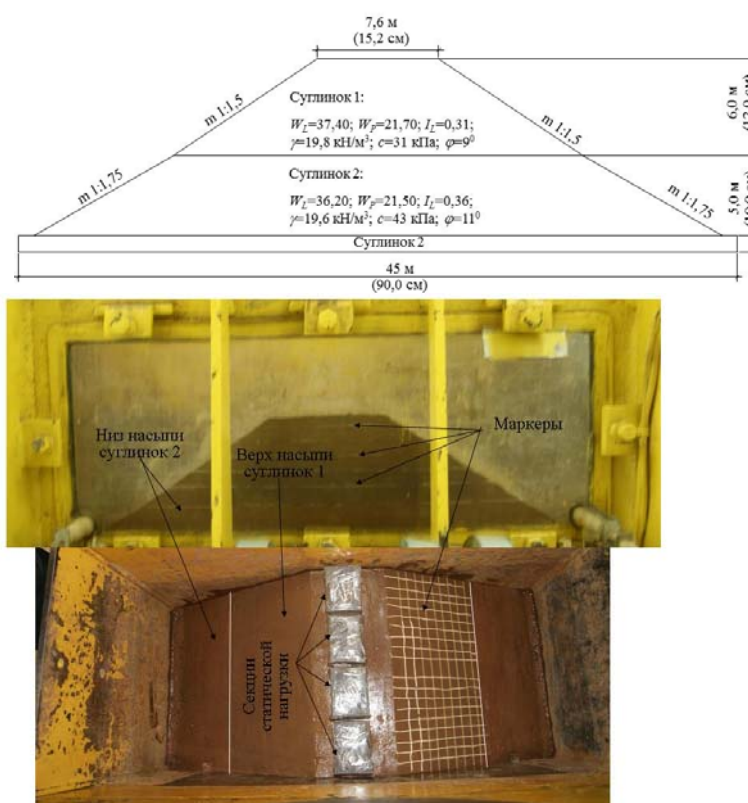


Рисунок 6 – Поперечный профиль модели насыпи. Фото модели в каретке центробежной установки

Таблица 2 – Результаты моделирования

| № Этапа моделирования | Интенсивность нагрузки | Результаты моделирования                                                                                               |
|-----------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 этап                | 30 кПа                 | Деформаций не наблюдалось                                                                                              |
| 2 этап                | 50 кПа                 | Деформаций не наблюдалось                                                                                              |
| 3 этап                | 115 кПа                | Зафиксированы значительные осадки насыпи, а также образование поверхности смещения массива грунта в поперечном сечении |



Рисунок 7 – Фото модели насыпи после моделирования. Статическая нагрузка 115 кПа

Оценка работоспособности экспериментальной модели проводилась по разработанной методике, где было установлено, что потеря несущей способности произошла при 121 кПа (коэффициент устойчивости насыпи ниже нормативного). Учитывая, что в экспериментальной модели потеря несущей способности произошла при нагрузке 115 кПа и образовалась поверхность смещения откоса, можно говорить о схожести расчетных данных с экспериментальными.

Соответственно, для оценки работоспособности насыпей на участке обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, в дальнейшем использовалась разработанная методика.

**В третьей главе** приводятся результаты оценки работоспособности насыпей по разработанной методике на участке обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, а также рекомендации по ограничению применения групповых решений для вновь проектируемых насыпей из глинистых грунтов на соответствующих участках.

Для оценки работоспособности насыпей, подверженных деформациям (числящихся в карточках ПУ-9) на исследуемом участке, были использованы характеристики насыпей (геометрические параметры, физико-механические характеристики грунтов), полученные из имеющихся на Московской железной дороге баз данных. Для каждой исследованной насыпи проводилась оценка работоспособности по несущей способности основной площадки и устойчивости откоса при осевых нагрузках вагонов от 23 тс/ось до 30 тс/ось.

По анализу полученных результатов исследований установлено, что при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой более 25 тс/ось, произойдет увеличение интенсивности деформирования земляного полотна, связанного как с несущей способностью основной площадки, так и устойчивостью

откосов насыпей. Процент деформирующегося земляного полотна, при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 30 тс/ось, вырастет более чем в 4 раза по оценке несущей способности и более чем в 2 раза по устойчивости откоса насыпи по сравнению с эксплуатацией поездов с осевой нагрузкой 23 тс/ось (табл. 3 и рис. 8).

Таблица 3 – Анализ работоспособности насыпей подверженных деформациям

| Показатель | Доля неработоспособного состояния насыпей, %<br>при осевой нагрузке вагонов $P$ , тс/ось |      |      |      |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|            | 23                                                                                       | 25   | 27   | 30   |
| $K_n$      | 5,9                                                                                      | 5,9  | 11,8 | 23,5 |
| $K_y$      | 14,7                                                                                     | 14,7 | 26,5 | 35,3 |

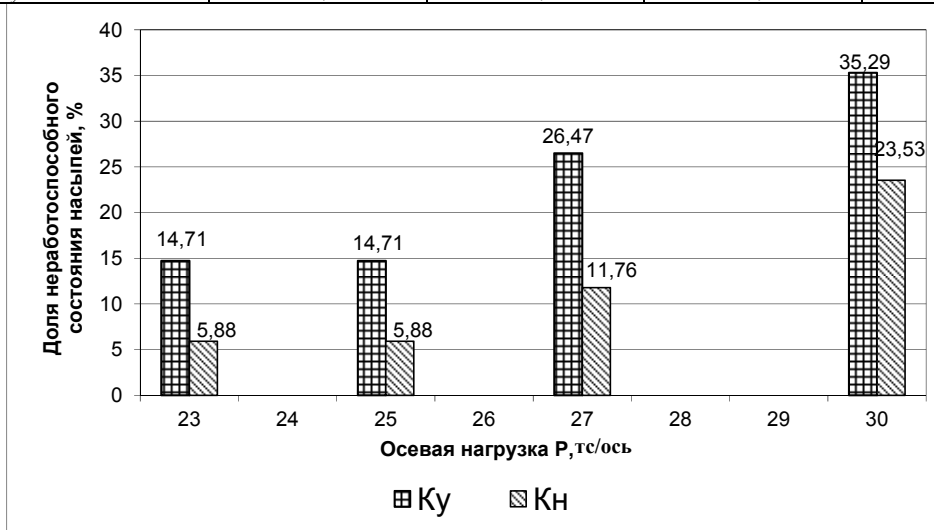


Рисунок 8 – Диаграмма изменения состояния насыпей в зависимости от осевой нагрузки вагонов

По разработанной методике была произведена оценка работоспособности обобщенного поперечного профиля насыпи с различными вариантами показателя текучести грунта  $I_L$  и крутизной откоса насыпи  $m$ , при воздействии на неё вагонов с осевой нагрузкой от 23 тс/ось до 30 тс/ось. При оценке устойчивости откоса насыпи дополнительно учитывалась высота насыпи.

По результатам оценки работоспособности были получены коэффициенты несущей способности основной площадки насыпей и устойчивости откосов насыпей. На основании анализа полученных результатов, сформированы рекомендации, при которых следует проводить усиление основной площадки ( $K_n \leq 1$ , рисунок 9) и/или устойчивости откосов насыпи ( $K_y < 1,25$ , таблица 4) на участке между станциями Вековка – Бекасово – Смоленск.

Например, из приведённых результатов на рисунке 9 следует, что для насыпи с крутизной откоса  $m$  1:1,50 и показателе текучести лёгкого суглинка  $I_L=0,45$ , возможна эксплуатация поездов с осевой нагрузкой вагона не более 25 тс/ось. Для пропуска поездов с большей осевой нагрузкой следует предусматривать мероприятия по повышению работоспособности насыпей по критерию несущей способности основной площадки.

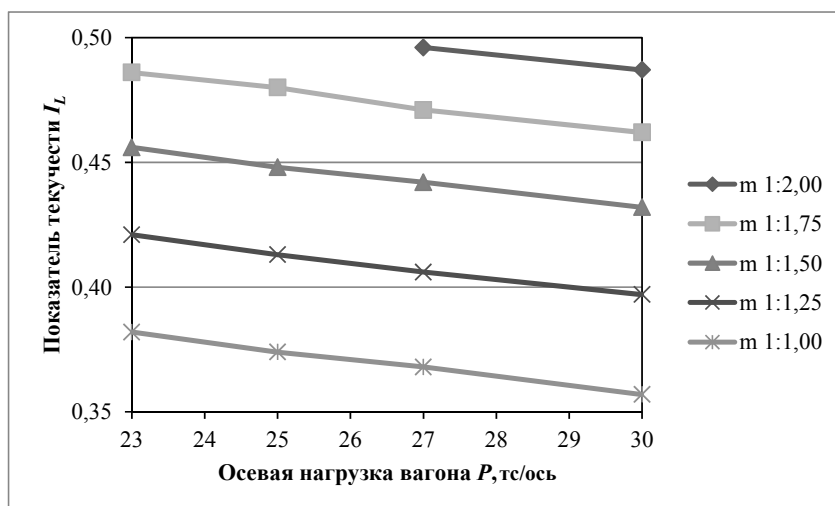


Рисунок 9 – Монограмма нахождения коэффициента несущей способности ( $K_n=1$ ) основной площадки насыпи на участке станций Вековка – Бекасово – Смоленск для насыпей сложенных лёгким суглинком

Таблица 4 – Неработоспособность насыпи по условию устойчивости откоса с крутизной  $m=2,00$ . Ядро насыпи - лёгкий суглинок

| Показатель текучести $I_L$ | Высота насыпи H, м | Коэффициент устойчивости $K_u$ при осевой нагрузке P, тс/ось |      |      |      |
|----------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                            |                    | 23                                                           | 25   | 27   | 30   |
| 0,35                       | 4                  | 1,47                                                         | 1,42 | 1,38 | 1,32 |
|                            | 5                  | 1,39                                                         | 1,35 | 1,31 | 1,26 |
|                            | 6                  | 1,34                                                         | 1,31 | 1,28 | 1,23 |
|                            | 7                  | 1,32                                                         | 1,29 | 1,26 | 1,22 |
| 0,40                       | 4                  | 1,31                                                         | 1,27 | 1,23 | 1,17 |
|                            | 5                  | 1,23                                                         | 1,19 | 1,16 | 1,12 |
|                            | 6                  | 1,19                                                         | 1,16 | 1,13 | 1,09 |
|                            | 7                  | 1,16                                                         | 1,14 | 1,11 | 1,08 |

Из таблицы 4 следует, что при показателе текучести грунта  $I_L=0,40$  и высоте насыпи  $H=4$  метра, работоспособность не будет обеспечена при эксплуатации поездов с осевой нагрузкой вагонов более 25 тс/ось, при высоте насыпи  $H=5$  метров – для эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой более 23 тс/ось включительно.

В отраслевой нормативной литературе (СТН Ц-01-95, СНиП 32-01-95, СП 32-104-98) рекомендуется при проектировании нового земляного полотна

применять групповые решения для насыпей высотой не более 6 метров из глинистых грунтов тугопластичной консистенции, с крутизной откоса  $m$  1:2,00. При этом, требуется устраивать защитные слои из дренирующих грунтов в основной площадке насыпи, мощность которых не менее 0,8 – 1,0 метра. Такая конструкция насыпи схожа с конструкцией насыпи, рассматриваемой в данной работе.

Проведенные ранее исследования показали, что устойчивость откосов может быть нарушена для насыпи высотой менее 6 метров сложенной тугопластичными суглинками. В связи с этим, была проведена оценка работоспособности применяемых групповых решений для проектирования насыпей сложенных тугопластичными суглинками на участках эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками. Физико-механические характеристики грунтов, для лёгкого и тяжёлого суглинков тугопластичной консистенции, принимались за нормативные значения.

Оценка работоспособности насыпи проводилась аналогичным образом как для насыпей на исследуемом участке между станциями Вековка – Бекасово – Смоленск большого Московского окружного кольца, результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты исследований неработоспособности насыпи (при групповом проектировании), сложенной лёгким и тяжёлым суглинком (несущая способность основной площадки)

| Наименование грунта | Крутизна откоса, $m=1$ : | Показатель текучести грунта $I_L$ | Сцепление грунта, $c$ , кПа | Угол внутреннего трения $\varphi$ , град | Несущая способность земляного полотна $q$ , кПа | Коэффициент несущей способности $K_n$ , при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой $P$ , тс/ось |      |      |      |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                     |                          |                                   |                             |                                          |                                                 | 23                                                                                               | 25   | 27   | 30   |
| Лёгкий суглинок     | 2,00                     | 0,40                              | 15                          | 19                                       | 81                                              | 1,21                                                                                             | 1,16 | 1,12 | 1,06 |
|                     |                          | 0,45                              | 12                          | 18                                       | 55                                              | 0,82                                                                                             | 0,79 | 0,76 | 0,72 |
|                     |                          | 0,50                              | 10                          | 17                                       | 35                                              | 0,52                                                                                             | 0,50 | 0,49 | 0,46 |
| Тяжёлый суглинок    | 2,00                     | 0,40                              | 21                          | 15                                       | 99                                              | 1,48                                                                                             | 1,42 | 1,37 | 1,30 |
|                     |                          | 0,45                              | 17                          | 14                                       | 72                                              | 1,07                                                                                             | 1,03 | 0,99 | 0,94 |
|                     |                          | 0,50                              | 14                          | 12                                       | 51                                              | 0,76                                                                                             | 0,73 | 0,71 | 0,67 |

По анализу исследований неработоспособности насыпи (табл. 5) установлено, что при проектировании земляного полотна не следует применять групповые решения для насыпи с крутизной откоса  $m$  1:2,00 и показателе текучести грунта лёгкого суглинка  $I_L \geq 0,45$ . Следует проводить индивидуальное проектирование, где реализуется усиление основной

площадки насыпи для обеспечения работоспособности по несущей способности. Для насыпи сложенной тяжёлым суглинком, с показателем текучести грунта  $I_L=0,45$ , не следует применять групповые решения при эксплуатации поездов с осевой нагрузкой более 25 тс/ось.

Результаты исследований неработоспособности насыпи по устойчивости откоса, с учётом высоты насыпи, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты исследований неработоспособности насыпи (при групповом проектировании), сложенной лёгким и тяжёлым суглинком. Крутизна откоса  $m=2,00$  (устойчивость откоса)

| Наименование грунта | Сцепление грунта $c$ , кПа | Угол внутреннего трения $\varphi$ , град | Показатель текучести $I_L$ | Высота насыпи $H$ , м | Коэффициент устойчивости $K_u$ при осевой нагрузке вагона $P$ , тс/ось |      |      |      |
|---------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                     |                            |                                          |                            |                       | 23                                                                     | 25   | 27   | 30   |
| Лёгкий суглинок     | 15                         | 19                                       | 0,40                       | 6                     | 1,45                                                                   | 1,42 | 1,40 | 1,36 |
|                     |                            |                                          |                            | 7                     | 1,39                                                                   | 1,37 | 1,34 | 1,31 |
|                     | 12                         | 18                                       | 0,45                       | 5                     | 1,37                                                                   | 1,34 | 1,31 | 1,27 |
|                     |                            |                                          |                            | 6                     | 1,29                                                                   | 1,27 | 1,24 | 1,21 |
|                     |                            |                                          |                            | 7                     | 1,24                                                                   | 1,22 | 1,20 | 1,17 |
| Тяжёлый суглинок    | 21                         | 15                                       | 0,40                       | 6                     | 1,48                                                                   | 1,44 | 1,41 | 1,37 |
|                     |                            |                                          |                            | 7                     | 1,41                                                                   | 1,38 | 1,35 | 1,32 |
|                     | 17                         | 14                                       | 0,45                       | 5                     | 1,35                                                                   | 1,31 | 1,28 | 1,24 |
|                     |                            |                                          |                            | 6                     | 1,26                                                                   | 1,24 | 1,21 | 1,18 |
|                     |                            |                                          |                            | 7                     | 1,20                                                                   | 1,18 | 1,16 | 1,13 |

Из анализа результатов таблицы 6 исследований неработоспособности насыпи по устойчивости откоса видно, что:

- для насыпи до 6 метров из лёгкого суглинка с показателем текучести грунта  $I_L=0,45$  и крутизной откоса  $m=2,00$  следует проводить индивидуальное проектирование при эксплуатации поездов с осевой нагрузкой более 25 тс/ось;

- для насыпи до 6 метров из тяжёлого суглинка с показателем текучести грунта  $I_L=0,45$ , крутизной откоса  $m=2,00$  следует проводить индивидуальное проектирование при эксплуатации поездов с осевой нагрузкой более 23 тс/ось.

Данные исследования показывают, что при проектировании насыпи высотой более 5 метров из глинистых грунтов тугопластичной консистенции, для участков эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками, следует ограничить применение групповых решений при проектировании насыпи, следует применять индивидуальное проектирование (см. табл. 5 и 6). На основании проведенных исследований, предлагается в действующем СТН Ц-01-95, в качестве дополнения, учитывать рекомендации по

проектированию насыпей из глинистых грунтов тугопластичной консистенции, приведённые в таблице 7.

Таблица 7 – Сфера применения групповых решений насыпей из глинистых грунтов на новых линиях при повышенных осевых нагрузках

| Наименование грунта                                           | Крутизна откоса при высоте насыпи $H > 5$ м | По несущей способности        | По устойчивости откоса        |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Глинистые грунты тугопластичной консистенции:<br>$I_L < 0,45$ | 1:2,00                                      | Групповые решения             | Групповое решение             |
| $I_L \geq 0,45$                                               |                                             | Индивидуальное проектирование | Индивидуальное проектирование |

На основании проведенных исследований в главе 3, были разработаны рекомендации по оценке работоспособности насыпей на участках эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками, позволяющие оперативно определять диапазон применения групповых решений для проектирования насыпей с учетом их физико-механических характеристик грунтов и геометрических параметров насыпей.

Для насыпей не являющиеся работоспособными следует провести их обеспечение по рекомендациям согласно блок-схемы на рисунке 5б.

**В четвертой главе** предложены способы обеспечения работоспособности земляного полотна на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

Для обеспечения работоспособности насыпи по условию несущей способности был проведён анализ конструкций усиления основной площадки. По результатам анализа было установлено, что наиболее часто используемой и эффективной конструкцией является устройство подбалластных защитных слоёв (ПЗС), где применяются геоматериалы, в частности георешётки. Рассмотренные российские и зарубежные конструкции ПЗС в основном регламентируют свойства материала (грунта) защитного слоя, но не дают полного представления о применяемых георешётках – не приводятся рекомендации по выбору георешётки в зависимости от её технических характеристик, даются только рекомендации по типу георешётки, плоская или объёмная.

В связи с этим, были проведены исследования зависимости снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток при усилении одним и двумя слоями геосинтетика.

В заводских технических характеристиках даются значения силы на разрыв и силы при 2% или 5% удлинении плоских георешёток. Учитывая, что требуется обеспечение работоспособности основной площадки, которая может работать в упругом состоянии, в дальнейшем принимается сила при 2 % удлинении.

Отношение осевой силы на единицу ширины и осевой деформации считается осевой жёсткостью георешётки (формула 2).

$$EA = \frac{F}{\Delta l / l} \quad (2)$$

где  $EA$  - осевая жёсткость на метр ширины, кН/м;

$F$  - растягивающая сила, кН;

$\Delta l / l$  - относительная деформация при растягивающей силе.

Для определения диапазона осевой жесткости георешёток были рассмотрены различные типы плоских георешеток разнообразных производителей.

По анализу характеристик георешёток установлено, что осевая жесткость варьируется от 280 кН/м до 700 кН/м. В дальнейшем оценка работоспособности основной площадки проводилась с усилением её георешётками, осевая жёсткость которых принята от 300 до 700 кН/м, с укладкой георешётки в один или два слоя. Один слой георешётки располагается на основной площадке насыпи; при двухслойном усилении георешётками, вторая георешётка располагается ниже первой на 0,2 метра. Конструкция усиления представлена на рисунке 10.

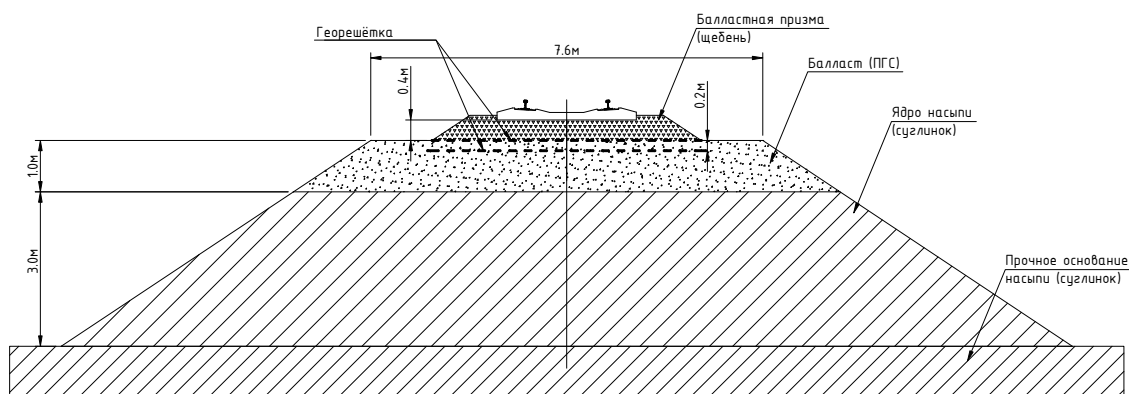


Рисунок 10 – Расчетная схема для оценки несущей способности насыпи усиленной двумя слоями георешётками

Для оценки работоспособности насыпи по несущей способности с усилением основной площадки различными типами георешёток, использовался программный комплекс Plaxis, который позволяет учитывать георешётку в расчетной схеме.

В расчётной схеме поездная нагрузка прикладывалась точно по осям рельсов на балку в виде шпалы. Такая схема приложения нагрузки на земляное полотно сравнима с эпюрой напряжений возникающих под поездами.

По результатам исследования получены отношения действующих и допускаемых коэффициентов нагрузок (напряжений), полученных при различных видах (осевой жёсткости) георешёток. Полученные отношения действующих и допускаемых напряжений выражаются в виде коэффициента армирования. На рисунке 11 приведены зависимости коэффициента армирования от осевой жёсткости георешётки.

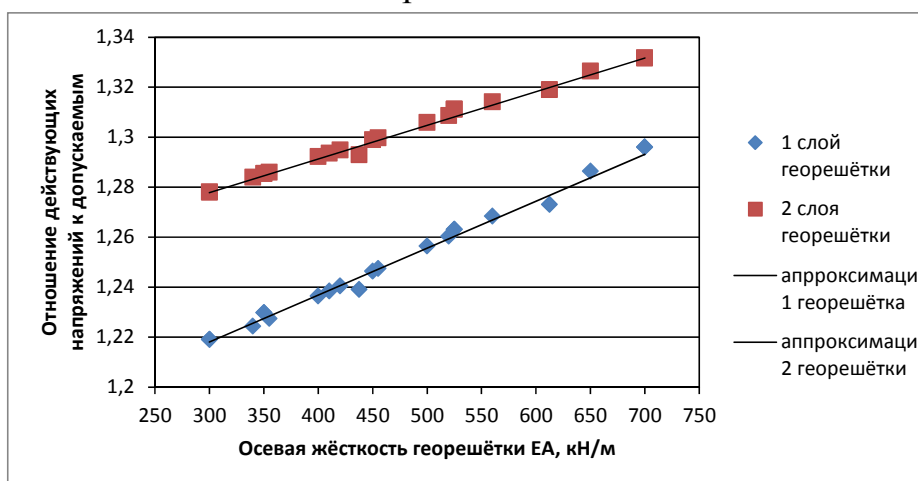


Рисунок 11 – Зависимости снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток

Из рисунка 11 следует, что зависимость снижения максимальных напряжений от осевой жёсткости георешётки имеет линейный характер. Снижения напряжений в зависимости от осевой жесткости георешётки варьируется от 22% до 33%.

Например, в зоне основной площадки насыпи действующие напряжения равны 100 кПа, при допускаемых напряжениях 80 кПа. Отсюда следует, что действующие напряжения следует снизить как минимум в 1,25 раза ( $100/80=1,25$ ). На основании приведенного графика (рис. 11) определяется требуемая осевая жесткость георешётки, т.е. следует применить один слой георешётки с осевой жесткости  $EA \approx 475$  кН/м, или два слоя георешётки с наименьшей осевой жёсткостью  $EA=300$  кН/м.

При усилении основной площадки насыпи двумя слоями георешётки, увеличивается эффект армирования более чем на 4%, по сравнению применения одного слоя георешётки.

На основании полученных результатов исследований (рис. 11), были предложены рекомендации по усилению основной площадки насыпи для

исследуемого участка эксплуатации поездов с повышенными осевыми нагрузками (табл. 8).

Таблица 8 – Рекомендаций по усилению основной площадки насыпей на полигоне Московской железной дороги (Вековка – Бекасово – Смоленск)

| Крутизна откоса $n$ , $m=1:n$ | Показ-ль текучести $I_L$ | Удельное сцепление грунта, $c$ кПа | Угол внутреннего трения, $\varphi$ град | Несущая способность земляного полотна $q$ , кПа | Рекомендуемая осевая жесткость георешётки $E_A$ , кН/м при осевой нагрузке вагона $P$ , тс/ось |               |         |         |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------|---------|
|                               |                          |                                    |                                         |                                                 | 23                                                                                             | 25            | 27      | 30      |
| 2,00                          | 0,50                     | 16                                 | 15                                      | 72                                              | -                                                                                              | -             | 300     | 300     |
| 1,75                          | 0,50                     | 16                                 | 15                                      | 63                                              | 300                                                                                            | 300           | 300     | 330     |
| 1,50                          | 0,45                     | 18                                 | 16                                      | 70                                              | -                                                                                              | 300           | 300     | 300     |
|                               | 0,50                     | 16                                 | 15                                      | 52                                              | 675/400                                                                                        | реконструкция |         |         |
| 1,25                          | 0,40                     | 21                                 | 16                                      | 76                                              |                                                                                                |               |         | 300     |
|                               | 0,45                     | 18                                 | 16                                      | 57                                              | 300                                                                                            | 400           | 650/350 | рек-ция |
|                               | 0,50                     | 16                                 | 15                                      | 41                                              | реконструкция                                                                                  |               |         |         |
| 1,00                          | 0,40                     | 21                                 | 16                                      | 60                                              | 300                                                                                            | 300           | 300     | 600/300 |
|                               | 0,45                     | 18                                 | 16                                      | 44                                              | реконструкция                                                                                  |               |         |         |
|                               | 0,50                     | 16                                 | 15                                      | 30                                              |                                                                                                |               |         |         |

\* числитель-рекомендуемая осевая жесткость георешётки уложенной в один слой, знаменатель-в два слоя

Из таблицы 8 видно, что для некоторых случаев следует проводить полную реконструкцию насыпи, т.к. георешётка не эффективна.

Для повышения работоспособности насыпи по условию обеспечения устойчивости откоса, предложен вариант усиления откоса за счёт применения отсева щебня сухой магнитной сепарации (СМС). Данный материал применялся при оперативном восстановлении насыпи 323 км участка Орел – Чернь (Орловская дистанция пути) Московской ж.д. в качестве сооружения контрбанкета. Отсевы щебня СМС получаются в результате первичной обработки руды на горно-обогатительных комбинатах (ГОК). Так Михайловский ГОК, находится вблизи от исследуемого участка обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, этим и объясним выбор данного материала.

Для оценки физико-механических свойств отсеков щебня СМС были проведены испытания по оценке его уплотняемости на опытной площадке. Для этого был сформирован разрыхлённый слой отсеков с последующим уплотнением их катком. После нескольких проходов катка отбирались пробы на плотность методом режущего кольца. Испытания проводились до тех пор, пока плотность отобранных образцов была неизменна. По результатам

испытаний было установлено, что коэффициент уплотнения был достигнут в районе 0,95.

В лабораторных условиях установлено, что по фильтрующим свойствам отсеvy щебня СМС считаются как водопроницаемые. Механические свойства близки к дисперсным грунтам. Особенностью данного материала, является то, что он обладает большим удельным весом  $> 26 \text{ кН/м}^3$ , что является преимуществом для отсыпки контрбанкета, который играет роль пригрузки и удержания откоса насыпи.

На основании рассмотренных способов обеспечения работоспособности насыпи были предложены варианты усиления насыпей подверженных деформациям.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Стратегия развития железнодорожного транспорта предполагает увеличение грузооборота перевозимых грузов на 40-45 % на ряде направлений к 2015 году. В частности на Московской железной дороге активно развивается обращение поездов с повышенными осевыми нагрузками на участке Вековка – Бекасово – Смоленск (Большого Московского окружного кольца).

Опыт прошлых лет показал, что на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками, земляное полотно подвержено образованию дефектов и деформаций в зоне основной площадки и откосов

1. В связи с этим, была разработана методика оценки работоспособности насыпи, совместно учитывающая условия несущей способности и устойчивости, с последующим обоснованием выбора параметров новых насыпей или технического решения для усиления существующих насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками.

2. На основании разработанной методики, была проведена оценка работоспособности насыпей подверженных деформациям на полигоне Московской железной дороги (Вековка – Бекасово – Смоленск). Анализ результатов полученных данных показал, что при эксплуатации вагонов с осевыми нагрузками более 25 тс/ось, произойдет увеличение интенсивности деформирования земляного полотна, связанного как с несущей способностью основной площадки, так и устойчивостью откосов насыпей.

3. Определена сфера применения групповых решений при проектировании насыпи высотой более 5 метров из глинистых грунтов тугопластичной консистенции, для участков эксплуатации поездов с

повышенными осевыми нагрузками, где следует ограничить применение групповых решений при проектировании насыпи, следует применять индивидуальное проектирование

4. Получены зависимости снижения максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от осевой жесткости георешеток при усилении одним и двумя слоями геосинтетика. Снижение напряжений достигается от 22% до 33%.

5. Разработаны рекомендации по выбору осевой жесткости и количества слоев георешеток для усиления основной площадки насыпей на полигоне Московской железной дороги (Вековка – Бекасово – Смоленск) и варианта повышения устойчивости откосов насыпей за счет применения отсева щебня сухой магнитной сепарации.

**Положения диссертации опубликованы в 7 печатных работах:**

1. Наумов В.В., Зайцев А.А. Техногенные материалы в конструкции усиления деформирующихся и потенциально опасных насыпей // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2008 «Наука МИИТа – ТРАНСПОРТУ». – М.: МИИТ, 2008. с. II-32 – II-33.
2. Наумов В.В. Некоторые технические решения по повышению эксплуатационной надежности земляного полотна на участках обращения тяжеловесных поездов // Труды V научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М.: МИИТ, 2008. с. 155-157.
3. **Наумов В.В., Зайцев А.А. Отсевы щебня для усиления земляного полотна // Журнал «Путь и путевое хозяйство», 2009. №4. с. 38-39.**
4. Наумов В.В. Надежность земляного полотна на участках обращения тяжеловесных поездов // Вестник ДИИТ. – Днепропетровск.: ДИИТ, 2009. с. 183-186.
5. Наумов В.В. Состояние земляного полотна на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками Труды VII научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М.: МИИТ, 2010. с. 99-104.
6. **Наумов В.В., Виноградов В.В. Земляное полотно при воздействии повышенных осевых нагрузок// Журнал «Путь и путевое хозяйство», 2011. №1. с. 22-24.**
7. **Наумов В.В., Виноградов В.В. Комплексная оценка работоспособности насыпей// Мир Транспорта, М., №2, 2012 г. – С.56-61.**

НАУМОВ ВАСИЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
НАСЫПЕЙ НА УЧАСТКАХ ОБРАЩЕНИЯ ПОЕЗДОВ С  
ПОВЫШЕННЫМИ ОСЕВЫМИ НАГРУЗКАМИ**

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и  
проектирование железных дорог

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано к печати\_\_\_\_\_Формат бумаги 60x84 1/16

Объем 1,5 п.л.      Заказ №\_\_\_\_\_      Тираж \_\_\_\_ экз.

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова 9, стр.9, УПЦ ГИ МИИТ