

На правах рукописи

**Ланис Алексей Леонидович**

**АРМИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ВЫСОКИХ НАСЫПЕЙ  
С ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ ТВЕРДЕЮЩИХ РАСТВОРОВ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и  
проектирование железных дорог

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта»

Научный консультант доктор технических наук, доцент

**Ашпиз Евгений Самуилович**

Официальные оппоненты: **Стоянович Геннадий Михайлович**,  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», кафедра «Железнодорожный путь», профессор

**Добров Эдуард Михайлович**,

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», кафедра «Аэропорты, инженерная геология и геотехника», профессор

**Аккерман Геннадий Львович**,

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Путь и железнодорожное строительство», профессор

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС)

Защита состоится «24» декабря 2019 г. в 12.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 218.005.15 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. № 7618.

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

Автореферат разослан «\_\_» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Королев Вадим Вадимович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенствование транспортной системы и повышение эффективности ее функционирования являются необходимыми условиями развития экономики Российской Федерации. В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р, «одним из основных приоритетов инвестиционной программы до 2025 года является выполнение целевых задач комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года, а также Указа Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204». Объем транзитных контейнерных перевозок по железным дорогам страны за этот период планируется повысить в четыре раза. При этом надежность и безопасность железнодорожной инфраструктуры являются основными показателями, требующими особого внимания.

Дальнейшее развитие железнодорожной отрасли невозможно без повышения надежности железнодорожного пути, основой которого является земляное полотно. Протяженность дефектного и деформирующегося земляного полотна в настоящее время составляет около 9 % общей протяженности железных дорог России. По отдельным полигонам более 50 % высоких насыпей находится в ненормативном состоянии. Снижение этого показателя позволит не только повысить рентабельность железнодорожного транспорта, но и обеспечить безопасность, что является приоритетной задачей. Поэтому вопросы, связанные с разработкой экономически эффективных способов усиления эксплуатируемых высоких насыпей железных дорог, имеют существенную актуальность.

Очевидно, что к оптимальным с экономической точки зрения методам усиления грунтов земляного полотна, в том числе высоких насыпей, относятся технологии, позволяющие производить работы с минимальным ограничением движения транспорта или без него. К таким технологиям можно отнести способы, основанные на армировании грунтовых массивов с использованием инъектирования твердеющих растворов.

Качественный уровень получаемых результатов зависит от всех стадий подготовки и реализации работ по усилению грунтовых массивов. При этом, в случае с земляным полотном эксплуатируемых железных дорог, получение качественных результатов существенно осложняется специфическими особенностями производства работ и отсутствием критериально обоснованной методологии проектирования усиления армированием с инъектированием твердеющих растворов. Эта проблема снижает качество проектирования и не обеспечивает получение заложенного в проект результата. Решение существующей проблемы обеспечения надежности эксплуатируемых высоких

насыпей железнодорожного пути и повышения экономической эффективности их усиления весьма актуально для транспортной отрасли.

**Степень разработанности темы исследований.** Исследования в области армирования грунтовых массивов, в том числе с целью практического применения для усиления эксплуатируемых высоких насыпей железных дорог, выполняли следующие ученые: Е. С. Ашпиз, В. В. Виноградов, Д. В. Волоцкий, Э. М. Добров, П. И. Дыдышко, А. А. Зайцев, В. Д. Казарновский, А. Ф. Колос, М. Я. Крицкий, С. Я. Луцкий, А. Н. Савин, В. М. Улицкий, Ю. К. Фроловский, А. А. Цернант, В. А. Явна.

За рубежом исследования в области армирования грунтовых массивов проводили Н. М. Abuel-Naga, D. T. Bergado, А. Камбефор, М. Люжон, Ф. Мулдер, К. Д. Джоунс, Дж. П. Жиро, Р. V. Palmeira., Н. Brandl, J. Grabe, В. Namidi, Е. Heins, N. Тура и др.

**Цель исследования:** повышение надежности эксплуатируемых высоких насыпей железнодорожного пути на основе развития теоретических положений, разработки и систематизации практических решений их усиления армированием с инъектированием твердеющих растворов.

Для достижения сформулированной цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1 Обосновать выбор способов армирования эксплуатируемых высоких насыпей при высокой деформативности и недостаточной несущей способности основной площадки и откосных частей и разработать модели армированных с инъектированием твердеющих растворов высоких насыпей, учитывающих параметры и элементы армирования для каждого из способов.

2 Разработать теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов в процессе армирования высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов для определения технологических параметров усиления.

3 Экспериментально исследовать конструктивные и технологические параметры армирования, которые характеризуют усиленный грунтовый массив в армированных высоких насыпях и позволяют уточнить и дополнить их модели.

4 Выполнить численное моделирование эксплуатируемых высоких насыпей, армированных с инъектированием твердеющих растворов, с целью разработки практических приемов проектирования, оценки адекватности составленных моделей и определения технологических параметров усиления.

5 Разработать методологию проектирования, систему практических решений армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов.

6 Подтвердить на опытных участках железных дорог техническую и экономическую эффективность разработанной на основе проведенных исследований методологии армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов.

**Объект исследования** – эксплуатируемые высокие насыпи из глинистых грунтов, имеющие недостаточную надежность.

**Предмет исследования** – закономерности повышения устойчивости и снижения деформируемости высоких насыпей, ослабленных в процессе эксплуатации железнодорожного пути, при усилении армированием с инъецированием твердеющих растворов.

**Научная новизна работы** заключается в решении проблемы теоретического обоснования и практического применения технологий усиления эксплуатируемых высоких насыпей железнодорожного пути армированием с инъецированием твердеющих растворов, установлении связей и закономерностей, отражающих изменение свойств грунтового массива. Полученные научные результаты состоят в следующем:

- разработаны и систематизированы модели армированных с инъецированием твердеющих растворов высоких насыпей для их применения при компьютерном моделировании;

- обоснованы критерии применения предложенных моделей, расчетных схем, а также состав и параметры элементов моделей;

- разработаны теоретические основы для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива в процессе инъецирования твердеющих растворов с использованием метода дискретных элементов;

- установлены функциональные зависимости изменения характеристик усиленного грунтового массива от параметров армирования и грунтовых условий;

- подтверждена гипотеза о том, что уплотненные зоны грунта вокруг затвердевшего раствора, образованные при напорном инъецировании и раскатке скважин, существенно влияют на работу армированного массива, что требует их учета в моделях как расчетного элемента;

- обоснованы критерии «плавности въезда» на железнодорожное мостовое сооружение в пределах участка переменной жесткости;

- разработаны теоретические основы методологии проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов.

**Практическая значимость работы.** Разработана методология армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих

растворов, включающая способы усиления, методику определения параметров армирования, обоснование выбора оборудования, методику контроля качества выполненных работ. Геотехнические и эксплуатационные особенности насыпи систематизированы и представлены в виде взаимосвязанных моделей, полученных по результатам экспериментальных и теоретических исследований, на основе натурального и численного моделирования.

Разработанная методология армирования может быть использована для усиления грунтов эксплуатируемых высоких насыпей железных дорог. Для практической реализации методологии предложены: способ ремонта железнодорожного земляного полотна (патент № 2277616, авторы: Крицкий М. Я., Ланис А. Л., Скоркин В. Ф., опубл. в бюл. № 16 от 10.06.2006 г.), способ упрочнения грунта (патент № 2314388, авторы: Крицкий М. Я., Ланис А. Л., опубл. в бюл. № 1 от 10.01.2008), способ ремонта водопропускной трубы под насыпью (патент № 2479688, автор: Ланис А. Л., опубл. в бюл. № 11 от 20.04.2013), способ укрепления откосов земляного полотна (патент № 2507343, авторы: Ланис А. Л., Скоркин В. Ф., Овчинников С. А., опубл. в бюл. № 28 от 10.10.2013), способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб (патент № 2588250, авторы: Ланис А. Л., Карелина Е. Л., опубл. в бюл. № 18 от 27.06.2016), способ контроля качества упрочнения грунтового массива (патент № 2288995, авторы: Крицкий М. Я., Ланис А. Л., Скоркин В. Ф., опубл. в бюл. № 34 от 10.12.2006), инъектор для упрочнения и закрепления грунтов (патент № 41743, авторы: Крицкий М. Я., Ланис А. Л., Скоркин В. Ф., Воронцов В. Б., опубл. в бюл. № 31 от 10.11.2004 г.), забивной инъектор (патент № 78496 авторы: Крицкий М. Я., Ланис А. Л., опубл. в бюл. № 33 от 27.11.2008), раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин (патент № 147223, авторы: Ланис А. Л., Ломов П. О., Скоркин В. Ф., опубл. в бюл. № 30 от 27.10.2014), инъектор для закрепления грунтов (патент № 165656, авторы: Ланис А. Л., Беяков Л. О., Овчинников С. А., опубл. в бюл. № 30 от 27.10.2016).

Часть исследовательских работ выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта (протокол от 11.08.2015 № 23/пр).

**Методология и методы исследования** базируются на применении системного подхода, основанного на комплексе теоретических и экспериментальных исследований, включающих натурное и численное моделирование, методы строительной механики, механики грунтов, методы статистической обработки результатов экспериментов и их корреляционного анализа, информационные технологии.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1 Численные модели армированных с инъектированием твердеющих растворов высоких насыпей, учитывающих параметры и элементы армирования для каждого из способов.

2 Теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов и определения технологических параметров усиления в процессе армирования высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов.

3 Результаты экспериментальных исследований элементов, конструктивных и технологических параметров армирования.

4 Методология проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов.

5 Система практических решений армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов.

**Достоверность результатов исследования** подтверждена применением современных методов расчета; сертифицированного оборудования; современных поверенных средств измерения, включая аттестованные испытательные комплексы геотехнической лаборатории, обеспечивающие требуемую точность и достаточный уровень надежности результатов определения физико-механических свойств армированных грунтов; существенным объемом экспериментальных данных; сопоставлением результатов математического моделирования с фактическими данными, полученными по результатам многолетнего опыта проектирования, усиления грунтовых массивов армированием на объектах гражданского строительства и транспортных сооружениях; установлением качественного совпадения результатов исследования автора диссертации с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Апробация и реализация результатов исследования.** Основные положения и материалы диссертационной работы были представлены на 22 международных конференциях и симпозиумах (пяти международных научно-практических конференциях, 14 международных конференциях, трех международных симпозиумах), региональных научно-практических и научно-технических конференциях, одной национальной конференции, на межконтинентальных семинарах и отраслевых совещаниях.

Результаты исследований внедрены на Западно-Сибирской и Красноярской железных дорогах – филиалах ОАО «РЖД», в проектных институтах – филиалах АО «Росжелдорпроект», в организациях, активно работающих в области усиления грунтовых массивов.

**Публикации по теме диссертации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 57 публикациях объемом 40,4 п. л. (личный вклад 20,9 п. л.), в том числе в статьях, опубликованных в журналах и сборниках трудов (из них 15 в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, (три из которых входят в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts), одна включена в базу научного цитирования Scopus, две – в Web of Science), получено 10 патентов РФ. Сведения, сформулированные при работе над диссертацией, приняты базовыми в монографии (объемом 11,4 усл. печ. л.), подготовленной в соавторстве.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Работа изложена на 409 страницах, содержит 150 рисунков и 56 таблиц. Список литературы включает 300 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель, задачи и методика исследований, показаны научная новизна и практическое значение работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, отражены сведения об апробации и реализации результатов исследования.

**В первой главе** диссертации выполнен анализ состояния эксплуатируемых насыпей железных дорог, а также методов их усиления. Дано обоснование выбранного направления работы.

Анализ научно-технической литературы указывает на ухудшение состояния земляного полотна железных дорог, сопровождающееся ростом числа отказов, с одной стороны, и необходимостью увеличения провозной способности путем повышения интенсивности воздействия, с другой. В зону риска повышения отказов при этом попадают эксплуатируемые высокие насыпи, в том числе за счет увеличения числа внезапных деформаций.

На опасность деформирования эксплуатируемых высоких насыпей указывали отечественные ученые: Т. Г. Яковлева, В. В. Виноградов, Е. С. Ашпиз, Г. М. Стоянович, Г. Г. Коншин, Ю. К. Фроловский. Выделены две группы основных причин потери устойчивости и повышения деформативности длительно эксплуатируемых насыпей: изменение структуры, свойств и состояния грунтов земляного полотна и возрастающая интенсивность воздействия поездных нагрузок.

Изучению вопросов влияния поездной нагрузки на техническое состояние эксплуатируемых высоких насыпей посвящены исследования многих отечественных ученых, в том числе крупнейших железнодорожных научных организаций: ВНИИЖТа, МИИТа, ВЗИИТа, ДвГУПСа, ПГУПСа, РГУПСа,

СГУПС, УрГУПС, СамГУПС, и др. Проведенные в странах ЕС, США, Китае, Индии, Австралии исследования по вопросу влияния интенсивности движения на состояние пути позволяют сделать вывод, что постоянная эксплуатация поездов повышенного веса и длины при ненадлежащем содержании пути приводит к увеличению интенсивности развития дефектов и деформаций земляного полотна. Основным деформациям подвержены высокие насыпи, отсыпанные глинистыми грунтами, которые подвержены ослаблению при увлажнении.

Изучение статистических данных позволило выделить три основных вида возможных последствий воздействия интенсивного движения на железнодорожное земляное полотно, представленное высокой насыпью, которые являются проблемными и для обычной эксплуатации:

- деформации основной площадки высокой насыпи;
- потеря устойчивости откосов земляного полотна, в том числе с захватом грунтового массива основания при глубокой поверхности скольжения;
- деформации земляного полотна на подходных насыпях (к мостам, путепроводам и др.).

Отмечено, что по сети потенциально на эти группы приходится более 30 % всех дефектов и деформаций земляного полотна и более 40 % внезапных деформаций. Таким образом, выделенные виды возможных последствий необходимо учитывать при разработке решений по усилению насыпей.

По результатам анализа существующей методики оценки надежности эксплуатируемых высоких насыпей установлен перечень минимально необходимых исходных данных для проведения подобных работ, выделены критерии оценки, а также сформулированы основные параметры. Основным способом решения проблемы недостаточной надежности земляного полотна эксплуатируемых высоких насыпей железнодорожных линий является его усиление, что позволит повысить пропускную способность, в том числе путем повышения осевых и погонных нагрузок.

Армирование грунтов для усиления железнодорожных сооружений используется достаточно давно и имеет широкое распространение. Использование инъектирования, усиления грунтов армированием набивными сваями в пробуренных, пробитых или раскатанных скважинах, устройство анкерных и нагельных конструкций, закрытых дренажей различной конструкции и тому подобного позволит существенно расширить круг решаемых проблем земляного полотна. Перспективность использования буроинъекционных свай, анкерных конструкций, стягивающих элементов, разрядно-импульсной технологии для армирования эксплуатируемых насыпей железных дорог подтверждена научными работами Т. Г. Яковлевой, Е. С. Ашпиза, В. В. Виноградова, А. А. Зайцева, А. Н. Савина, А. П. Хамова, Л. А. Смоляницкого, А. Ф. Колоса, Ю. К. Фроловского, Г. Н. Гаврилова, И. А. Веприяка, что нашло отражение в указаниях МПС еще в 90-х гг. прошлого века. В области усиления армированием насыпей автомобильных дорог известны работы Д. В. Волоцкого, Э. М. Доброва.

В данной главе обоснована перспективность использования комбинированных способов и модификаций армирования с использованием инъектирования твердеющих растворов, позволяющих производить работы с минимальным ограничением движения или без него.

Расчетно-теоретическое обоснование армирования с инъектированием, необходимое для проектирования мероприятий и непосредственно усиления эксплуатируемых высоких насыпей в нормативной и научно-технической литературе отсутствуют. Использование известных аналитических решений для проектирования не представляется возможным. Для использования численного моделирования необходимо выполнение теоретических исследований по разработке и систематизации числовых моделей, учитывающих параметры и элементы армирования для каждого случая.

**Во второй главе** по результатам качественной и количественной оценки зон армирования эксплуатируемых высоких насыпей выполнено теоретическое обоснование выбора способов армирования; предложен системный подход к определению параметров усиления с составлением и обоснованием матрицы численных моделей по способу армирования и виду деформаций; разработаны теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов и определения технологических параметров усиления.

Оценка зон армирования эксплуатируемых высоких насыпей с определением их расположения и характера НДС выполнена по результатам моделирования деформаций и потери устойчивости высокой насыпи по выявленным последствиям интенсивного воздействия нагрузок с использованием метода конечных элементов. Для армирования эксплуатируемых высоких насыпей сформулированы критерии и теоретически обоснованы следующие способы:

- напорное инъектирование твердеющих растворов;
- объемное армирование (формирование структуры из горизонтально ориентированных линейных армирующих элементов, объединенных в единый каркас вертикально ориентированными элементами, сформированными путем напорного инъектирования твердеющего раствора);
- армирование набивными сваями в раскатанных скважинах (заполнение скважин выполняется посредством инъектирования твердеющего раствора при бытовом или избыточном давлении).

Все перечисленные способы армирования объединены единым термином «армирование с инъектированием», под которым применительно к эксплуатируемым высоким насыпям железных дорог предлагается понимать усиление грунтовых массивов армоэлементами из (либо с использованием) инъектируемого твердеющего цементного раствора, вокруг которого имеются зоны из уплотненного грунта.

Выполненные автором исследования позволили выдвинуть гипотезу о том, что уплотненные зоны грунта вокруг затвердевшего раствора, образованные при напорном инъецировании и раскатке скважин, существенно влияют на работу армированного массива, что требует их учета в математических моделях как расчетного элемента.

В рамках разработки методологии армирования высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов, включающей методики расчета и проектирования, разработаны и систематизированы модели армирования эксплуатируемых высоких насыпей (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица моделей армирования высоких насыпей

Способ армирования	Деформации основной площадки	То же вследствие развития балластных углублений	Потеря местной устойчивости	Потеря устойчивости в теле насыпи	Потеря устойчивости с захватом основания	Деформации подходов насыпей
Напорное инъецирование	M1.1	M2.1	–	–	–	M6.1
Объемное армирование	M1.2	–	M3.2	M4.2	–	–
Армирование набивными сваями в раскатанных скважинах	–	–	–	–	M5.3	M6.3

Моделированием установлено, что решение проблемы возникновения сверхнормативных деформаций основной площадки из-за недостаточных значений физико-механических характеристик грунтов тела высокой насыпи (высотой  $H$ , м) заключается в армировании рабочей зоны сооружения (мощностью  $z$ , м) напорным инъецированием твердеющих растворов или объемным армированием. С учетом обеспечения указанных выше требований разработаны соответствующие модели высокой насыпи (M1.1 и M1.2), представленные на рисунках 1 и 2 соответственно.

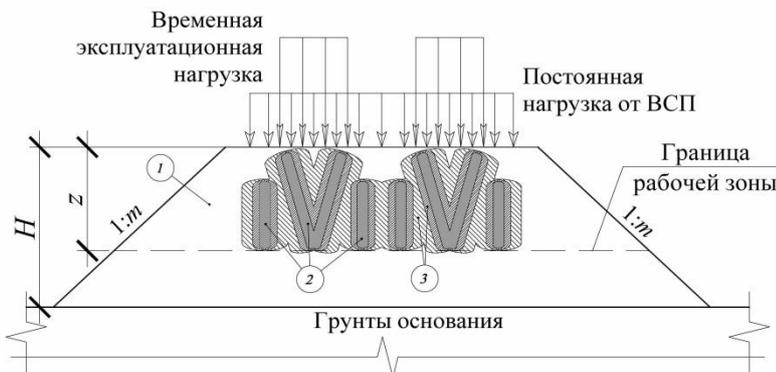


Рисунок 1 – Модель M1.1

Основными элементами модели M1.1 (рисунок 1), являются: 1 – грунтовая среда тела насыпи с исходными значениями физико-механических характеристик; 2 – армоэлементы, представленные в данном случае массивами затвердевшего раствора, которые образуются по оси погружаемого инъектора;

3 – зоны уплотненного грунта вокруг армоэлементов.

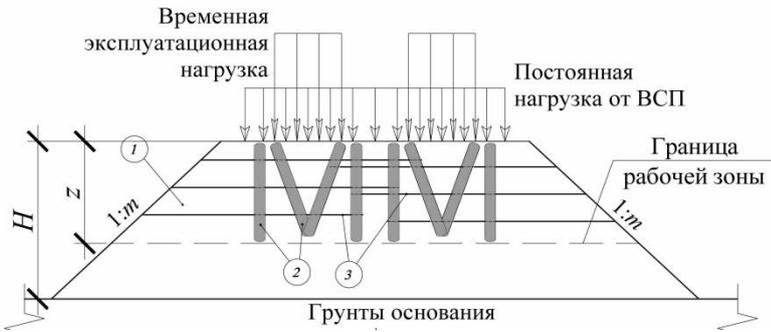


Рисунок 2 – Модель М1.2

массива, включающего затвердевший раствор и балластный материал. На рисунке 3 представлена модель М2.1 эксплуатируемой высокой насыпи с развивающимся балластным углублением, усиленной напорным инъецированием твердеющего раствора.

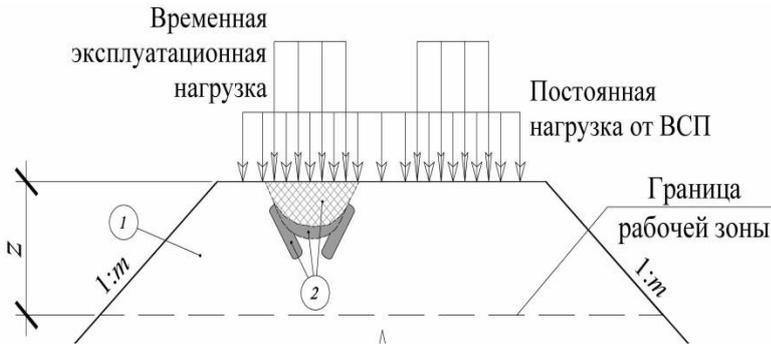


Рисунок 3 – Модель М2.1

ми затвердевшего раствора, образованными в результате заполнения ослабленной зоны и омоноличивания материала балластного углубления. Зоны уплотнения грунта вокруг армоэлементов при этом не учитываются.

Модель М3.2, представленная на рисунке 4, разработана для повышения местной устойчивости откосной части эксплуатируемой высокой насыпи и включает объемное армирование в области возможных поверхностей скольжения (зон пластических сдвиговых деформаций). Грунтовая среда 1 в модели М3.2 учитывает балластные шлейфы, негативно влияющие на местную устойчивость; армоэлементы в модели представлены столбами затвердевшего раствора 2 и горизонтальными стержнями 3.

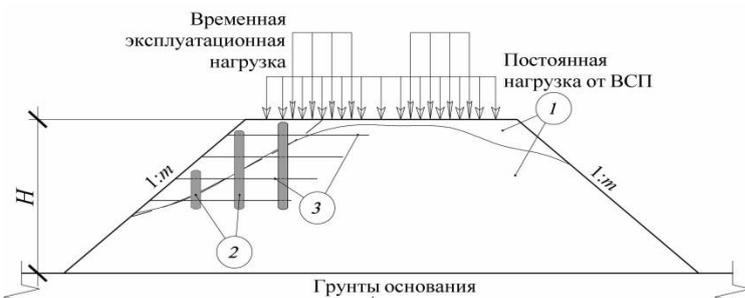


Рисунок 4 – Модель М3.2

М3.2, но в модели М4.2 участок усиления захватывает большую часть насыпи, как и потенциальная поверхность скольжения при потере общей устойчи-

Решение проблемы возникновения сверхнормативных деформаций из-за развития балластных углублений заключается в усилении последних путем нагнетания твердеющего раствора и создания упрочненного

Принцип формирования модели М2.1 и обозначения схож с моделью М1.1. При этом армоэлементы 2 (рисунок 3) представлены в данном случае столбами затвердевшего раствора, а также массива-

Для повышения общей устойчивости в теле эксплуатируемой высокой насыпи в модели М4.2 реализовано объемное армирование. Элементы модели М4.2 аналогичны элементам модели

ности (рисунок 5).

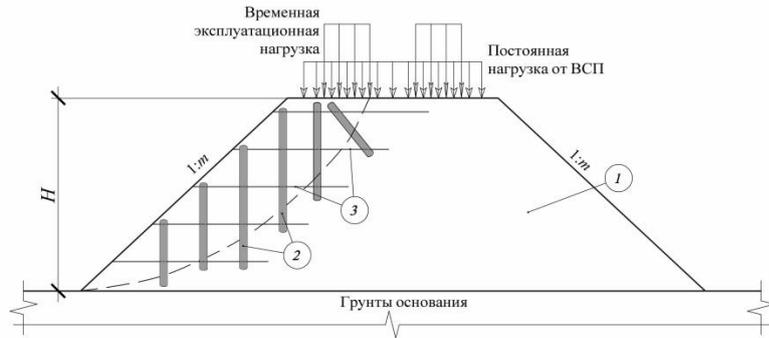


Рисунок 5 – Модель М4.2

наличия слабых грунтовых слоев, расположенных под подошвой откосной части насыпи. Согласно проведенным исследованиям решение данной проблемы может быть достигнуто за счет армирования основания набивными сваями в раскатанных скважинах. Соответствующая модель М.5.3 приведена на рисунке 6.

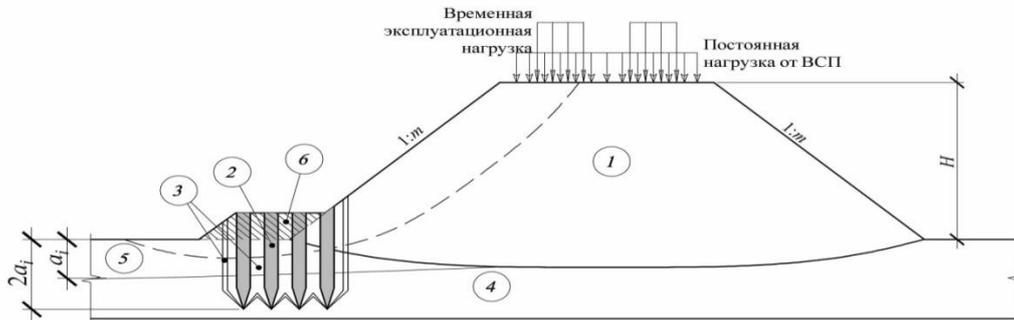


Рисунок 6 – Модель М5.3

Модель М 5.3 является шестиэлементной: 1 – грунтовая среда тела насыпи; 2 – армоэлементы, представленные набивными сваями из затвердевшего раствора; 3 – уплотненный грунт вокруг армоэлементов; 4, 5 – соответственно прочный и слабый грунтовый массив основания насыпи; 6 – технологическая досыпка, необходимая для устройства набивных свай.

Важным требованием к участку подходной насыпи к мосту является его переменная жесткость, которая может быть достигнута варьированием параметрами при армировании напорным инъектированием или набивными сваями в раскатанных скважинах. Соответствующие модели М6.1 и М6.3 приведены на рисунках 7 и 8.

Модель М6.1 принята трехэлементной, как и модель М1.1. Модель М6.3 также является трехэлементной, особенности формирования армирующих элементов и зон уплотненного грунта схожи с моделью М5.3.

Для моделей М6.1 и М6.3 назначаются (см. рисунки 7 и 8) несколько участков армирования длиной  $l_1, l_2, l_3, l_4 \dots l_n$ , м, и высотой  $h_1, h_2, h_3, h_4 \dots h_n$ , м, в зависимости от требований к переменной жесткости подходной насыпи.

Моделирование деформирования земляного полотна показало, что потеря общей устойчивости по глубокой поверхности скольжения с захватом основания может происходить в том числе из-за

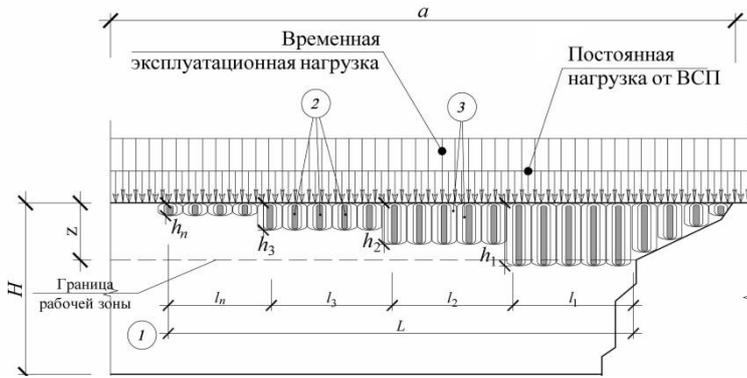


Рисунок 7 – Модель Мб.1

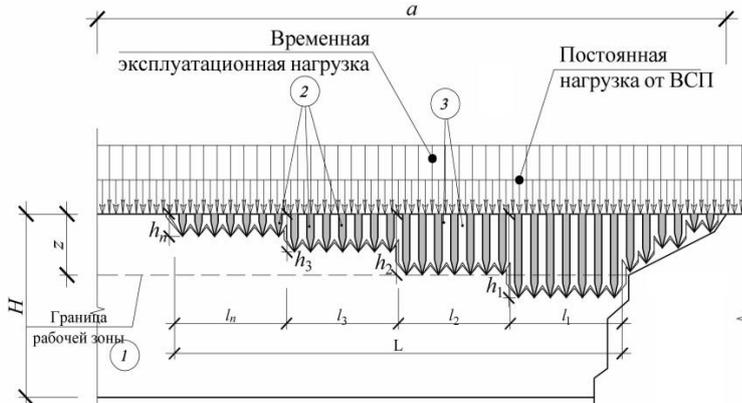


Рисунок 8 – Модель Мб.3

В ряде случаев на эксплуатируемых участках высоких насыпей возможны сочетания сразу нескольких последствий интенсивного воздействия поездных нагрузок. В таких случаях возможно применение комбинаций из разработанных моделей армирования.

Эффективное армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов предполагает нагнетание твердеющего раствора в грунтовой массив без существенного изменения его объема с

уплотнением окружающего грунта. Для подбора соответствующих технологических параметров необходимо учитывать изменения НДС грунтового массива. Для этого в работе получены следующие аналитические решения:

1 Решение для определения напряженного состояния грунтового массива в непосредственной близости от области инъецирования твердеющего раствора, которое характеризуется системой

$$\sigma_r = \sigma_0 \frac{r_0^2}{r^2}, \quad \sigma_t = [(1-k)\xi + k\xi']\sigma_r, \quad \tau_{rt} = \frac{\sin\theta \cos\theta(\sigma_r - \sigma_t)}{\sin^2\theta - \cos^2\theta} k, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  и  $r_0$  – давление и радиус включения твердеющего раствора;

$\sigma_r, \sigma_t, \tau_{rt}$  – напряжения (радиальные, окружные и тангенциальные в сферической системе координат;

$k$  – коэффициент, определяемый как  $k = (r - r_0)/(r_d - r_0)$ ,  $r_0 \leq r \leq r_d$ .

Уравнения (1) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{rN} &= \sigma_r / \sigma_0, \quad \sigma_{tN} = \sigma_t / \sigma_0, \quad \tau_{rtN} = \tau_{rt} / \sigma_0, \quad r_N = r / r_0, \quad r_{dN} = r_d / r_0, \\ \sigma_{rN} &= 1 / r_N^2, \quad \sigma_{tN} = [(1 - k_N)\xi + k_N \xi'] \sigma_{rN}, \\ \tau_{rtN} &= \frac{\sin\theta \cos\theta(\sigma_{rN} - \sigma_{tN})}{\sin^2\theta - \cos^2\theta} k_N, \end{aligned} \quad (2)$$

и граничные условия записываются как:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r=r_0) &= \sigma_0, & \sigma_t(r=r_0) &= \xi \sigma_0, & \tau_{rt}(r=r_0) &= 0, \\ \sigma_x(r=r_d) &= \sigma_{hx}, & \sigma_z(r=r_d) &= \sigma_{hz}, & \tau_{xz}(r=r_d) &= 0,\end{aligned}\quad (3)$$

или в безразмерном виде

$$\begin{aligned}\sigma_{rN}(r_N=1) &= 1, & \sigma_t(r_N=1) &= \xi, & \tau_{rt}(r_N=1) &= 0, \\ \sigma_{xN}(r_N=r_{dN}) &= \sigma_{hx} / \sigma_0, & \sigma_{zN}(r_N=r_{dN}) &= \sigma_{hz} / \sigma_0, & \tau_{xzN}(r_N=r_{dN}) &= 0,\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\sigma_{xN} = \sigma_x / \sigma_0$ ,  $\sigma_{zN} = \sigma_z / \sigma_0$ ,  $\tau_{xzN} = \tau_{xz} / \sigma_0$ .

2 Решение для определения геометрических размеров зоны влияния (расстояние  $r_d$  от центра до поверхности эллипсоида и полуоси эллипсоида  $a_x, a_z$ ) на окружающие грунты инъецирования твердеющего раствора, которые находятся по формулам

$$r_d = \frac{a_x a_z}{\sqrt{a_x^2 \cos^2 \theta + a_z^2 \sin^2 \theta}}, \quad (5)$$

$$a_x = r_0 \sqrt{\sigma_0 / \sigma_{hx}}, \quad a_z = r_0 \sqrt{\sigma_0 / \sigma_{hz}}, \quad (6)$$

или в безразмерном виде

$$r_{dN} = \frac{a_{xN} a_{zN}}{\sqrt{a_{xN}^2 \cos^2 \theta + a_{zN}^2 \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

$$a_{xN} = \sqrt{\sigma_0 / \sigma_{hx}}, \quad a_{zN} = \sqrt{\sigma_0 / \sigma_{hz}}. \quad (8)$$

3 Решение для определения объема инъецируемого твердеющего раствора при заданном давлении инъецирования

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \frac{n_d - n_{\min}}{a_x - r_0} \left[ \frac{1}{4} k a_x^4 + \frac{1}{3} (1-k) r_0 a_x^3 - r_0^3 a_x + \frac{1}{3} \left( \frac{k}{4} + 2 \right) r_0^4 \right], \quad (9)$$

где  $n_d$  – пористость грунта;

$n_{\min}$  – минимальная пористость для данных грунтовых условий.

4 Решение для определения предельного давления инъецирования твердеющего раствора

$$\sigma_0 = \left( \frac{r_d}{r_0} \right)^{k_1} \left[ \sigma_d - r_d^{-k_1} \operatorname{ctg} \alpha \left( \gamma \frac{r_0^{k_1+1} - r_d^{k_1+1}}{k_1 + 1} + 2c \frac{r_0^{k_1} - r_d^{k_1}}{k_1} \right) \right], \quad (10)$$

где  $\gamma, \varphi, c$  – параметры массива грунта;

$\xi$  – коэффициент бокового расширения;

$k_1$  – коэффициент, зависящий от параметров грунта и угла образующей  $\alpha$ .

Моделирование процесса инъецирования твердеющих растворов в грунтовый массив с оценкой НДС в зоне усиления возможно выполнить методом дискретных элементов (МДЭ), для чего была модифицирована модель дискретной геосреды.

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 9, определены си-

лы, возникающие при взаимодействии частиц на контакте между частицами геосреды.

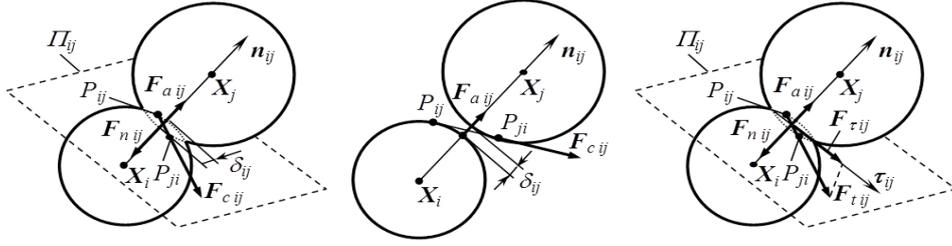


Рисунок 9 – Схема сил при взаимодействии частиц на контакте между частицами геосреды

Сила отталкивания  $F_{nij}$  всегда направлена против нормали  $n_{ij}$ . Модуль силы  $F_{nij} = |F_{nij}|$  находится из соотношения

$$F_{nij} = \begin{cases} kE_{ij}r_{ij}^a\delta_{ij}^b, & \delta_{ij} > 0, \\ 0, & \delta_{ij} \leq 0, \end{cases} \quad (11)$$

Сила  $F_{aij}$  адгезии ориентирована по нормали  $n_{ij}$  и по модулю равна:

$$F_{aij} = \begin{cases} E_{aij}r_{ij}(\delta_{ij}^* + \delta_{ij}), & \delta_{ij} > -\delta_{ij}^*, \\ 0, & \delta_{ij} \leq -\delta_{ij}^*. \end{cases} \quad (12)$$

Для  $i$ -го элемента сила когезии  $F_{cij}$  действует от точки  $P_{ij}$  к точке  $P_{ji}$  и по модулю равна:

$$F_{cij} = \begin{cases} E_{cij}r_{ij}\varepsilon_{ij}, & \varepsilon_{ij} < \varepsilon_{ij}^*, \\ 0, & \varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{ij}^*, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{ij}^* = r_{ij}C_{cij}/E_{cij}$ ;  $C_{cij} = \min(C_{ci}, C_{cj})$ ;  $E_{cij} = 2E_{ci}E_{cj}/(E_{ci} + E_{cj})$ .

При  $\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{ij}^*$  происходит разрушение когезионной составляющей сцепления. При повторном перекрытии элементов она не восстанавливается.

По модулю сила трения  $F_{\tau ij}$  равна:

$$F_{\tau ij} = \begin{cases} \operatorname{tg} \varphi_{ij} F_{nij} \delta_{\tau ij} / \delta_{\tau ij}^*, & \delta_{\tau ij} < \delta_{\tau ij}^*, M_{ij}, M_{ji} \in \Psi_{ij}, \\ k_{\varphi} \operatorname{tg} \varphi_{ij} F_{nij}, & \delta_{\tau ij} \geq \delta_{\tau ij}^*, M_{ij}, M_{ji} \in \Psi_{ij}, \\ 0, & M_{ij} \notin \Psi_{ij} \text{ или } M_{ji} \notin \Psi_{ij}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\delta_{\tau ij} = |\varepsilon_{ij} \cos \alpha_{ij}|$  ( $\alpha_{ij}$  – угол наклона  $\varepsilon_{ij}$  к  $\tau_{ij}$ );

$M_{ij}, M_{ji}$  – проекции  $P_{ij}, P_{ji}$  на плоскость  $\Psi_{ij}$  по контакту трения.

Для описания перемещений элементов используются уравнения движения твердых тел, основывающиеся на втором законе Ньютона.

Таким образом, для решения задач в области геомеханики получены:

- модель грунта, учитывающая силы отталкивания, трения, сцепления, которые возникают на контактах между частицами геосреды;

- формулы для описания положения центров масс и тензоров инерции частиц – кластеров произвольной формы, составленных из шаровых элементов;

- модифицированный метод дискретных элементов, основанный на уравнениях движения частиц и усовершенствованной модели грунта, обеспечивающий возможность использования кластеров.

**В третьей главе** представлены результаты полевых и лабораторных экспериментальных исследований, планирование которых предопределяется необходимостью решения сформулированной задачи 3.

Полевые экспериментальные исследования выполнялись на реальных объектах железнодорожной инфраструктуры и строительных площадках, близких по грунтовым условиям, в период с 2004 по 2016 г. на основе многофакторного дисперсионного анализа по методу латинских квадратов. Выполнение экспериментальных исследований по объемному армированию осуществлялось на натурной модели насыпи. Для исследования усиленных грунтовых массивов проводились следующие виды испытаний: статически вдавливающими нагрузками с использованием плоских и винтовых штампов; консолидированный срез целиков; динамическое зондирование; вскрытие шурфов с замером включений затвердевшего раствора, с отбором монолитов уплотненного грунта и кернов раствора.

Площадки и оборудование, используемые при проведении экспериментальных исследований, приведены на рисунке 10.

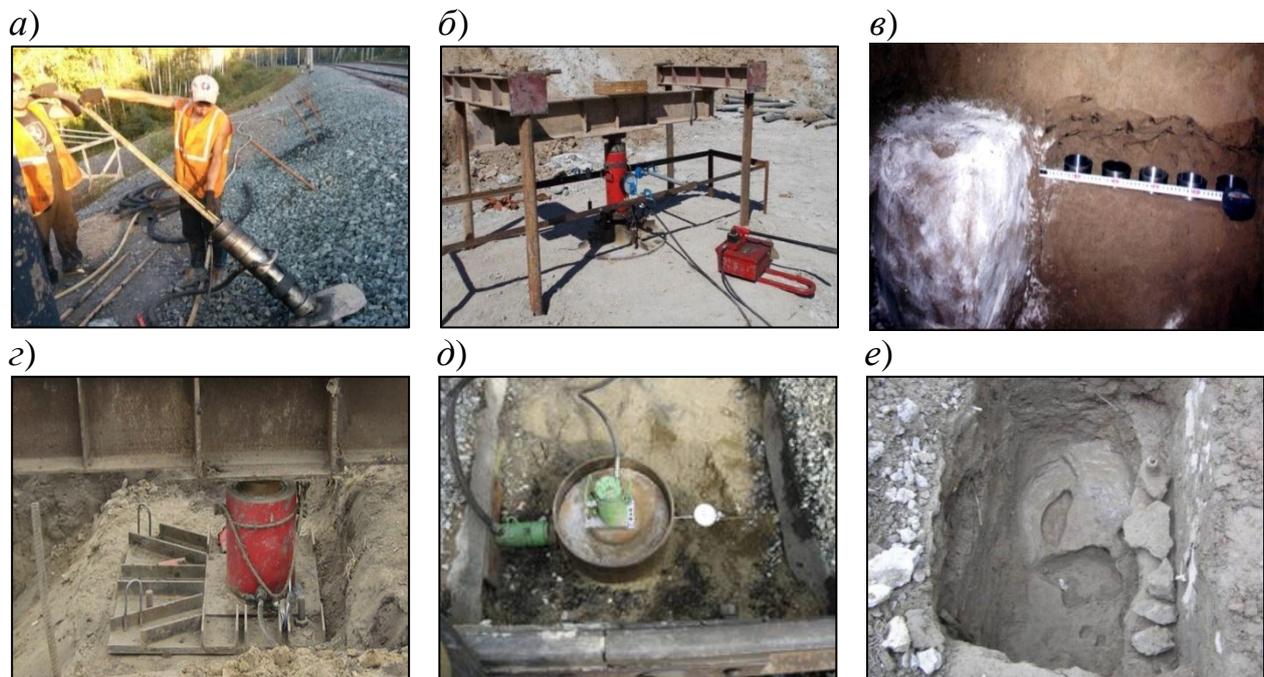


Рисунок 10 – Площадки и оборудование, используемые при проведении экспериментальных исследований:

- a* – инъектирование твердеющего раствора на опытной площадке;
  - б* – установка штампового испытания; *в* – отбор образцов уплотненного грунта около включения затвердевшего раствора; *г* – штамп для испытания натурной модели насыпи; *д* – установка среза целиков;
  - е* – затвердевший раствор в контрольном шурфе
- Для исследования конфигураций затвердевшего раствора и степени

уплотнения окружающего грунта при напорном инъецировании усиленные грунтовые массивы вскрывались шурфами (см. рисунок 10, е). На различном расстоянии до включения раствора (массива, столба или пластины) отбирались монолиты с последующим их исследованием в лаборатории (см. рисунок 10, в). Графические зависимости, отражающие изменение плотности скелета грунта с увеличением расстояния от включения затвердевшего раствора, полученные по результатам полевых и лабораторных исследований, представлены на рисунке 11.

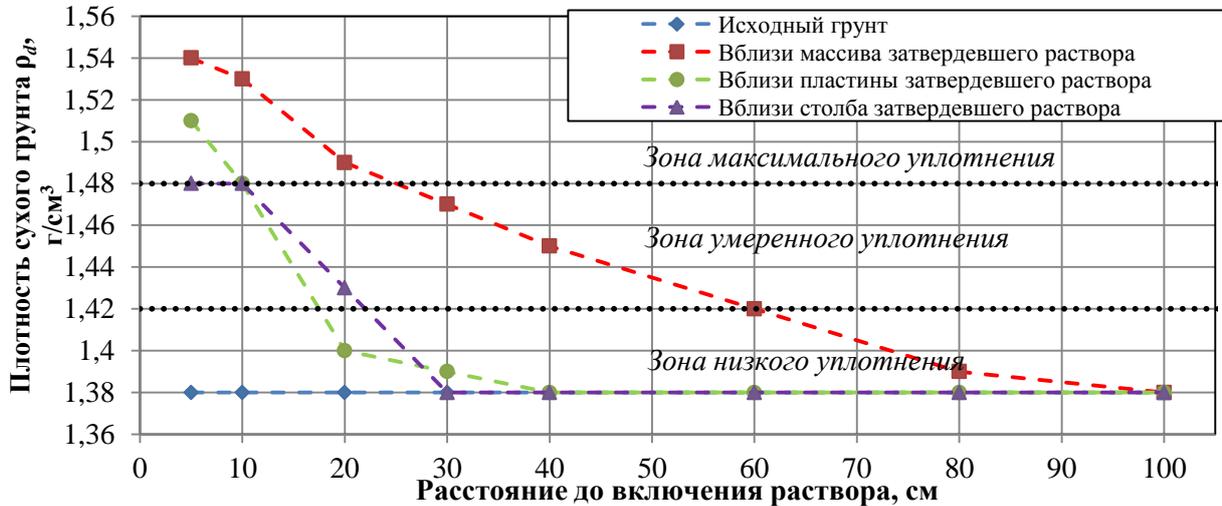


Рисунок 11 – Изменение плотности сухого грунта  $\rho_d$  с увеличением расстояния от затвердевшего раствора для напорного инъецирования

Выполненные исследования позволили выявить элементы армирования для напорного инъецирования, которые представлены на рисунке 12:

- затвердевший раствор, формируемый столбами и массивами, контуры которых стремятся к цилиндрической форме, расположенными вдоль осей забивки инъекторов;

- уплотненный вокруг массивов и столбов затвердевшего раствора грунт, характеризующийся зонами максимального, умеренного и низкого уплотнения.

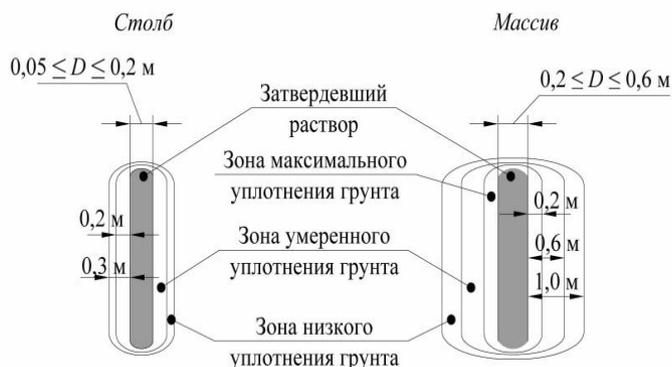


Рисунок 12 – Элементы армирования для напорного инъецирования

Установление параметров армирования, оказывающих существенное влияние на работу усиленного объемным армированием массива, выполнено с использованием неполного четырехфакторного анализа по методу латинских квадратов. Схема проведения экспериментов приведена на рисунке 13.

Код	L	Код		1					2					3					4					5				
		B, м		0,29					0,51					0,73					0,94					1,16				
		Код	h, м	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
α <sub>с</sub>	α <sub>н</sub>	0,3	0,26	0,23	0,19	0,16	0,3	0,26	0,23	0,19	0,16	0,3	0,26	0,23	0,19	0,16	0,3	0,26	0,23	0,19	0,16	0,3	0,26	0,23	0,19	0,16		
1	1/5	1	25	■																								
		2	30							6																		
		3	35			1																						
		4	40																									
		5	45																									
2	1/4	1	25																									
		2	30																									
		3	35																									
		4	40																									
		5	45																									
3	1/3	1	25																									
		2	30																									
		3	35																									
		4	40																									
		5	45																									
4	1/2	1	25																									
		2	30																									
		3	35																									
		4	40																									
		5	45																									
5	1/1	1	25																									
		2	30																									
		3	35																									
		4	40																									
		5	45																									

Рисунок 13 – Схема проведения полевых экспериментов на натурной модели насыпи, усиленной объемным армированием

Выполнены испытания грунтов натурной модели насыпи, усиленной объемным армированием, статическими вдавливающими нагрузками с помощью плоского штампа, с определением модуля упругости усиленного массива и предельного давления на штамп, при котором в насыпи возникали критические деформации (см. рисунок 10, з). Моделировались следующие элементы армирования: затвердевший раствор в форме столбов диаметром 20 см вдоль осей забивки инъекторов; горизонтальные стержневые элементы, расположенные в теле насыпи ярусами и объединенные вертикальными столбами затвердевшего раствора.

Установлены параметры армирования, оказывающие существенное влияние на работу усиленного объемным армированием массива. К ним относятся: глубина заделки стержневых элементов в устойчивый массив грунта, шаг расстановки стержней и точек инъектирования твердеющего раствора.

Экспериментальные исследования массива, усиленного армированием набивными сваями в раскатанных скважинах, выполнены на основе трехфак-

торного дисперсионного анализа по методу латинских квадратов. Используемая установка для штамповых испытаний представлена на рисунке 10, б. В качестве факторов эксперимента выбраны коэффициент пористости грунта, показатель текучести грунта и предел прочности набивной сваи на сжатие. Полученные зависимости для модуля деформации усиленного массива от значащих параметров представлены на рисунке 14.

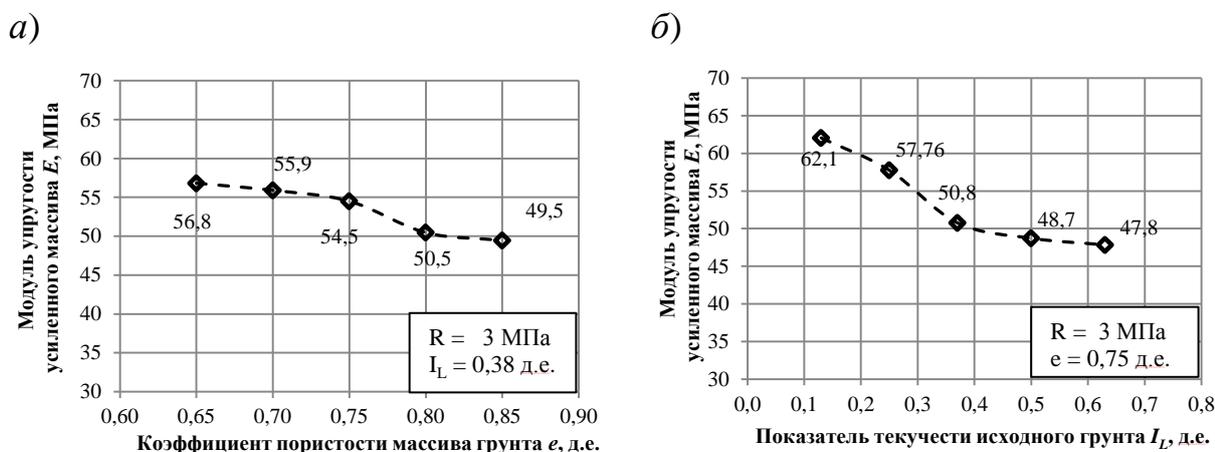


Рисунок 14 – Влияние значащих параметров армирования для набивных свай в раскатанных скважинах на модуль упругости усиленного массива:

а – коэффициента пористости исходного массива грунта  $e$ ;

б – показателя текучести исходного грунта  $I_L$

Как можно видеть из рисунка 14, большее влияние на результат армирования набивными сваями в раскатанных скважинах оказывает  $I_L$ . При этом отмечено, что данный показатель оказывает существенное влияние и на конечный диаметр раскатанной скважины. Выполненные полевые экспериментальные исследования позволили получить графическую зависимость, отражающую влияние показателя текучести и коэффициента пористости грунта на изменения диаметра раскатанной скважины, представленную на рисунке 15, а также закономерность изменения (сужения) диаметра скважины за счет влияния грунтовых условий:

$$\Delta D = d_1 + d_2 e(1,63 - e) + d_1 I_L(1,45 - I_L) + d_3 e I_L, \quad (15)$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – коэффициенты, полученные в ходе статистической обработки материалов полевых экспериментов ( $d_1 = -540, d_2 = 880, d_3 = 920$ );

$e$  – коэффициент пористости грунта, д. е.;

$I_L$  – показатель текучести грунта, д. е.

Для повышения эффективности армирования в мягкопластичных грунтах на основании выполненных исследований разработана модификация раскатчика скважин с полым валом и выходным отверстием.

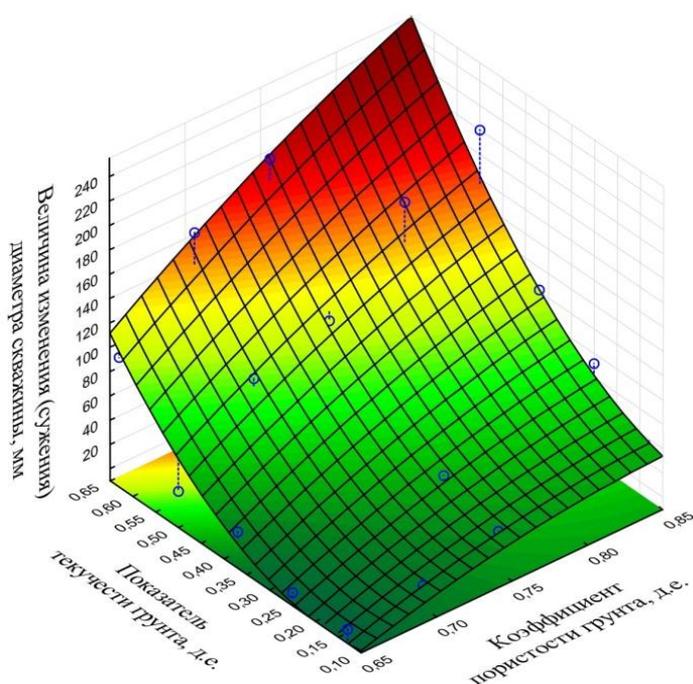


Рисунок 15 – Изменение диаметра раскатанной скважины от значащих параметров

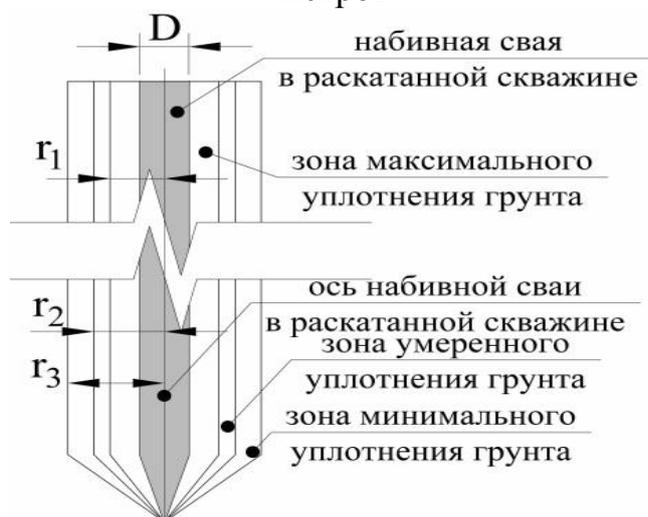


Рисунок 16 – Элементы армирования для набивных свай в раскатанных скважинах

Для оценки изменения физико-механических характеристик грунта в зонах уплотнения была получена функциональная зависимость коэффициента пористости грунта от расстояния до оси раскатанной скважины путем статистической обработки результатов экспериментальных и лабораторных исследований монолитов уплотненного грунта, отобранных на различном расстоянии от раскатанной скважины в виде

$$e = e_0 - \frac{T}{1 + K \left( \frac{r - r_{CB}}{r_{CB}} \right)^n}, \quad (16)$$

где  $e_0$  – коэффициент пористости грунта до уплотнения раскаткой;

$K, T, n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от значения коэффици-

Выполненные исследования позволили установить элементы армирования при усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, представленные на рисунке 16:

- набивные сваи из затвердевшего раствора диаметром  $D$ ;

- уплотненный вокруг набивных свай грунт. В супесях в зависимости от показателя текучести максимальное уплотнение при  $D = 250$  мм наблюдается в интервале от 15 до 22 см ( $r_1$ ) от оси набивной сваи, умеренное уплотнение в интервале от 22 до 30 см ( $r_2$ ), минимальное уплотнение в интервале от 25 до 50 см ( $r_3$ ). В суглинках в зависимости от показателя текучести максимальное уплотнение при  $D = 250$  мм наблюдается в интервале от 15 до 20 см ( $r_1$ ) от оси набивной сваи, умеренное уплотнение в интервале от 20 до 25 см ( $r_2$ ), минимальное уплотнение в интервале от 25 до 50 см ( $r_3$ ).

Для оценки изменения физико-

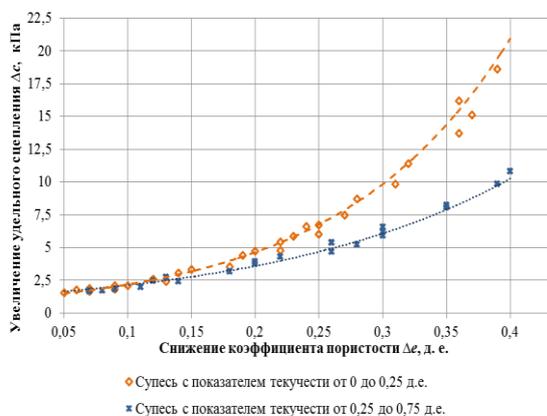
ента пористости  $e_0$ , вида и консистенции грунта;

$r$  – расстояние от оси набивной сваи до точки определения коэффициента пористости уплотненного грунта, м;

$r_{св}$  – радиус набивной сваи, м.

Для оценки увеличения удельного сцепления грунта, уплотненного раскаткой скважин, на основании лабораторных исследований получены соответствующие зависимости для супесей и суглинков (рисунок 17).

а)



б)

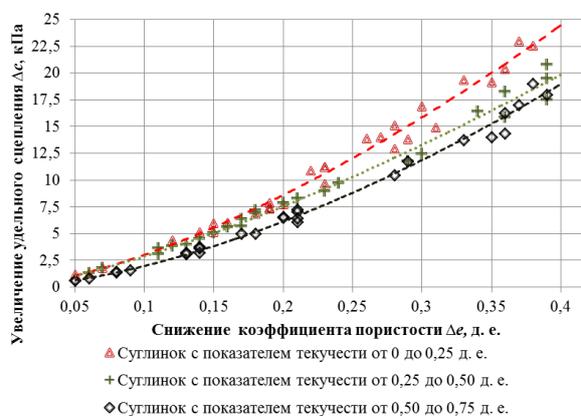


Рисунок 17 – Увеличение удельного сцепления  $\Delta c$  от снижения коэффициента пористости  $\Delta e$ : а – для супесей; б – для суглинков

В лабораторных условиях были исследованы различные армирующие составы, используемые при инъектировании. Рассмотрены 13 рецептур армирующих составов, для которых определены предел прочности на сжатие, изгиб и модуль деформации на 7-е, 14-е и 28-е сутки твердения раствора. Полученные данные лабораторных исследований образцов твердеющего раствора позволили разработать методику подбора армирующих составов.

**Четвертая глава** отражает теоретические исследования, выполненные на основе численного моделирования с целью разработки практических приемов проектирования, оценки адекватности составленных моделей и определения технологических параметров.

Для практических целей выполнены исследования по определению зависимости модуля упругости армированного напорным инъектированием грунтового массива рабочей зоны высокой насыпи (РЗВН) от параметра армирования. Расчетная схема модели М1.1 приведена на рисунке 18.

При исследовании модели М1.1 варьировались следующие параметры армирования и грунтовые условия:

- относительный объем затвердевшего раствора  $\varepsilon_v$ : от 0,016 до 0,145 м<sup>3</sup> р-ра/ м<sup>3</sup> грунта;
- модуль упругости затвердевшего раствора  $E_{p-p}$ : от 165 до 680 МПа;
- модуль упругости грунтов тела насыпи  $E_{гр}$ : от 25 до 45 МПа.

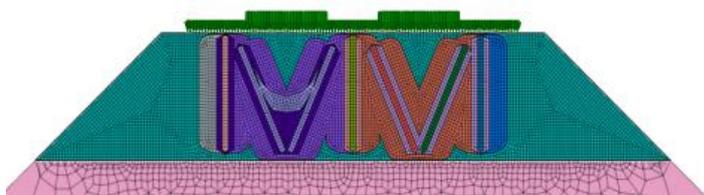


Рисунок 18 – Расчетная схема модели М1.1 (по величине упругой осадки) грунтового массиву с конкретными параметрами армирования. Статистическая обработка материалов численного моделирования позволила получить зависимость модуля упругости усиленного массива от параметров армирования (рисунок 19).

При компьютерном моделировании выполнялся подбор эквивалентного слоя рабочей зоны высокой насыпи (РЗВН), соответствующего

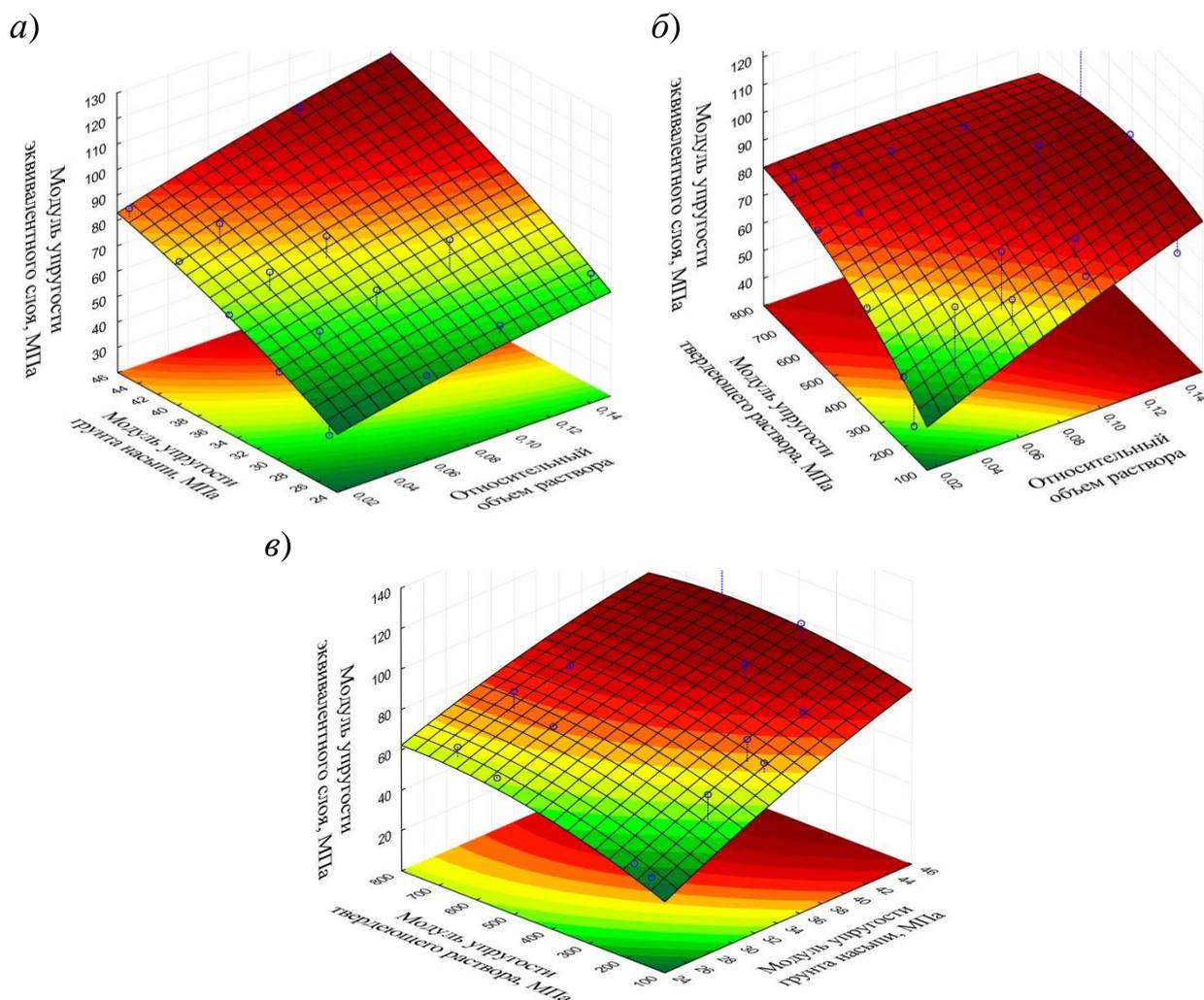


Рисунок 19 – Зависимость модуля упругости эквивалентного слоя (усиленного массива) от параметров армирования и грунтовых условий:

$a$  – от  $E_{гр}$  и  $\epsilon_v$ ;  $b$  – от  $E_{р-р}$  и  $\epsilon_v$ ;  $v$  – от  $E_{гр}$  и  $E_{р-р}$

На основании полученных поверхностей влияния определена функциональная зависимость изменения модуля упругости усиленного грунтового массива (эквивалентного слоя) от параметров армирования и грунтовых условий:

$$E = A_1 \epsilon_v + A_2 E_{гр}^3 + A_3 E_{р-р}^2 + E_{гр} (A_4 + 1) + A_5 \ln(E_{р-р}) + A_6, \quad (17)$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$  – постоянные величины, определенные при статистической обработке материалов численного моделирования, равные  $A_1 = 35,75$ ,  $A_2 = 0,0322$ ,  $A_3 = -0,353$ ,  $A_4 = 12,73$ ,  $A_5 = 3,557$ ,  $A_6 = -137,74$ ;

$E$  – модуль упругости массива, усиленного напорным инъецированием.

Средневзвешенный модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $h_i$

$$E_i = 0,9522 \left( \frac{h_i}{z} \right)^{0,877} (E_z - E_{гр}) + E_{гр}, \quad (18)$$

где  $E_i$  – модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $h_i$  ( $0 < h_i < z$ ) для проектирования усиления участка подходной насыпи к мосту;

$E_z$  – модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $z$ , достигается варьированием параметрами армирования по зависимости (17).

Для случая усиления РЗВН набивными сваями в раскатанных скважинах выполнены аналогичные исследования по расчетной схеме модели М6.3 (рисунок 20) с различным сочетанием параметров армирования и грунтовых условий:

- относительный коэффициент армирования  $\xi$ : от 2 до 6;
- модуль упругости затвердевшего раствора  $E_{р-р}$ : от 165 до 680 МПа;
- модуль упругости грунтов тела насыпи  $E_{гр}$ : от 25 до 45 МПа.

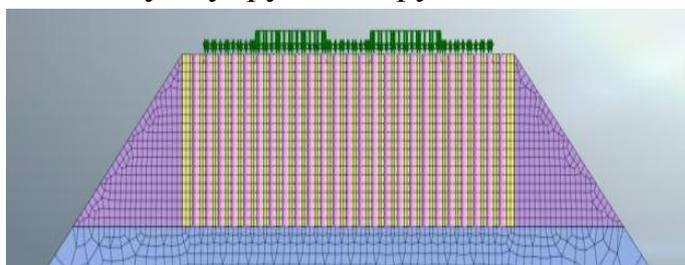


Рисунок 20 – Расчетная схема модели М6.3

При усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах значимый вклад в снижение деформативности массива вносят все исследованные параметры (рисунок 20).

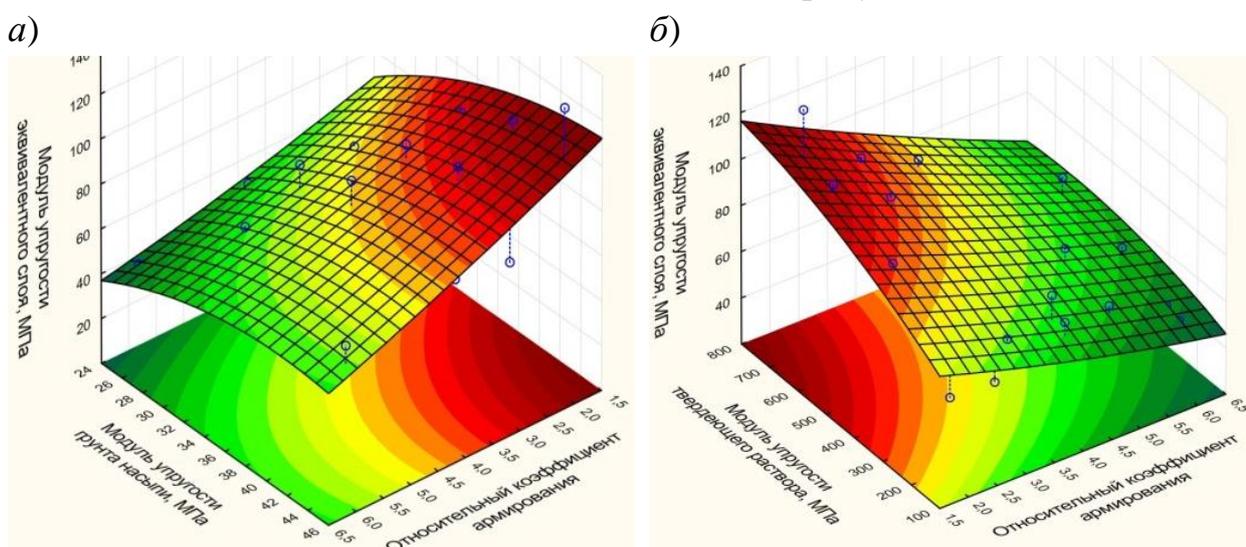


Рисунок 21 – Зависимость модуля упругости эквивалентного слоя (усиленного массива) от параметров армирования и грунтовых условий (начало):

*а* – от  $E_{гр}$  и  $\xi$ ; *б* – от  $E_{р-р}$

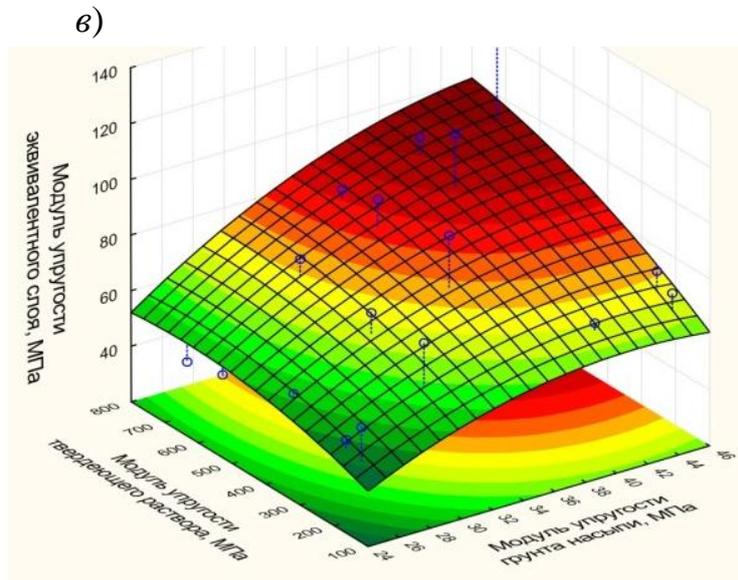


Рисунок 21 – Зависимость модуля упругости эквивалентного слоя (усиленно-го массива) от параметров армирования и грунтовых условий (окончание):

$\nu$  – от  $E_{гр}$  и  $E_{p-p}$

С использованием поверхностей влияния определена функциональная зависимость изменения модуля упругости усиленного грунтового массива (эквивалентного слоя) от параметров армирования и грунтовых условий:

$$E = A_1 \xi^k + A_2 \ln E_{гр} + A_3 \ln E_{p-p} + A_4, \quad (19)$$

где  $E$  – модуль упругости массива, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах;

$$A_1 = 43,16, A_2 = 18,79, A_3 = 5,33, A_4 = -50,125; k = -0,468.$$

Средневзвешенный модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $h_i$

$$E_i = 0,8983 \left( \frac{h_i}{z} \right)^{0,7717} (E_z - E_{гр}) + E_{гр}, \quad (20)$$

где  $E_i$  – модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $h_i$  ( $0 < h_i < z$ ) для проектирования усиления участка подходной насыпи к мосту;

$E_z$  – модуль упругости РЗВН при высоте армирования  $z$ , достигаемый варьированием параметрами армирования.

Для определения критериев «плавности въезда» в пределах подходной насыпи выполнены исследования по установлению неравномерности осадки основной площадки для участков переменной жесткости при использовании нормативных решений. Под термином «плавность въезда» на железнодорожное мостовое сооружение понимается закономерность изменения продольного уклона на участке переменной жесткости, при которой не возникает значимых динамических воздействий на конструкции пути и подвижной состав при въезде последнего на железнодорожное мостовое сооружение. Проведенные исследования позволили получить оптимальную функциональную зависимость изменения уклона основной площадки (в пределах участка пе-

ременной жесткости) в зависимости от расстояния от сооружения, на основании которой сформированы критерии обеспечения плавности въезда участка подходной насыпи к мосту (таблица 2).

Таблица 2 – Критерии плавности въезда для участков подходных насыпей к мостам

Критерий	Пороговое значение
<i>Участок переменной жесткости длиной 15 м в грунтах с модулем упругости E = 50 МПа</i>	
Закономерность изменения уклона $i$	$i \approx f(x) = (-2 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,00513x^2 - 0,512x + 2,9295)10^{-3}$ ( $\pm 0,5 \text{ ‰}$ )
Максимальный уклон $i_{\max}$	3 ‰
Средний уклон $i_{\text{ср}}$	1,5 ‰
<i>Участок переменной жесткости длиной 15 м в грунтах с модулем упругости E = 80 МПа</i>	
Закономерность изменения уклона $i$	$i \approx f(x) = (-0,0844x + 1,612)10^{-3}$ ( $\pm 0,5 \text{ ‰}$ )
Максимальный уклон $i_{\max}$	1,6 ‰
Средний уклон $i_{\text{ср}}$	1,1 ‰
<i>Участок переменной жесткости длиной 25 м в грунтах с модулем упругости E = 50 МПа</i>	
Закономерность изменения уклона $i$	$i \approx f(x) = (-0,488x^3 + 25,04x^2 + 460,14x + 3220,9)10^{-6}$ ( $\pm 0,5 \text{ ‰}$ )
Максимальный уклон $i_{\max}$	3,2 ‰
Средний уклон $i_{\text{ср}}$	0,8 ‰
<i>Участок переменной жесткости длиной 25 м в грунтах с модулем упругости E = 80 МПа</i>	
Закономерность изменения уклона $i$	$i \approx f(x) = (-0,49658x^2 + 20,19x + 211,15)10^{-5}$ ( $\pm 0,5 \text{ ‰}$ )
Максимальный уклон $i_{\max}$	2,1 ‰
Средний уклон $i_{\text{ср}}$	0,7 ‰

Для оценки адекватности составленных моделей выполнено сопоставление значений модуля упругости усиленного массива, полученного в полевых экспериментах и путем расчета по зависимостям (17) и (19). Разброс значений модуля упругости усиленного напорным инъецированием грунтового массива находится в пределах 10 %. Разброс значений модуля упругости для грунтового массива, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах, находится в пределах 20 %. Это говорит о том, что разработанные модели с достаточной точностью отражают внутренние процессы работы массивов, армированных с инъецированием. Выявленные функциональные зависимости возможно использовать для назначения параметров армирования при проектировании усиления грунтов высоких насыпей.

Выполненные сравнительные расчеты с учетом и без учета уплотненных зон вокруг затвердевшего раствора позволили подтвердить выдвинутую гипотезу о существенном их влиянии на работу армированного массива. Если в расчетной схеме М1.1 (см. рисунок 18) не учитывать уплотнение зоны грунта вокруг затвердевшего раствора, значение модуля упругости эквивалентного слоя снижается на 15 % (в зависимости от параметров армирования). Для случая армирования набивными сваями в раскатанных скважинах получены

схожие данные.

Результаты выполненных методом дискретных элементов расчетов сопоставлены с результатами моделирования устойчивости откосов насыпей, выполненного с использованием центробежного моделирования под руководством профессора Т. Г. Яковлевой (рисунок 22). Сравнение показало близкую сходимость результатов. Это говорит в пользу того, что с использованием МДЭ возможно успешно решать задачи механики грунтов, связанные с расчетами земляного полотна.

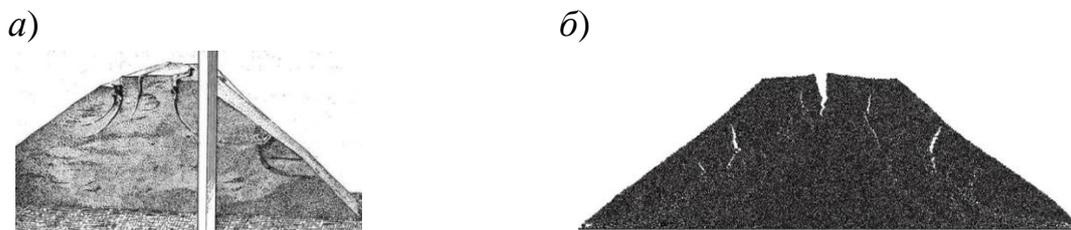


Рисунок 22 – Деформированный вид насыпи:

*а* – по результатам эксперимента; *б* – по результатам расчета модели

Предложенная модификация метода дискретных элементов, включая усовершенствованную модель грунта, на основании которых разработан основной алгоритм, позволяет выполнять моделирование процессов инъецирования твердеющих растворов вглубь насыпного массива (рисунок 23). При моделировании таких процессов МДЭ прослеживаются области, заполненные инъецируемым раствором, области нарушенной структуры грунта (зоны уплотненного грунта), направление выхода раствора из зоны усиления в случае повышенного объема нагнетаемого раствора. Выполненное исследование позволяет сделать вывод о том, что с помощью моделирования методом дискретных элементов процессов инъецирования твердеющих растворов вглубь массива с высокой степенью достоверности возможно подбирать некоторые технологические параметры инъецирования.



Рисунок 23 – Инъецирование твердеющего раствора

**В пятой главе** диссертации разработана методология проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов, представленная в виде системы алгоритмов; разработаны и систематизированы практические решения; представлены результаты внедрения и оценки экономической эффективности.

В основу методологии проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов положены результаты экспериментальных и теоретических исследований. В работе учте-

ны результаты опытного внедрения методов усиления и контроля качества работ на объектах Западно-Сибирской, Красноярской, Забайкальской железных дорог – филиалах ОАО «РЖД» и других объектах Сибирского федерального округа. Общий вид алгоритма проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов приведен на рисунке 24. Начиная с аналитического блока проектирования, разработанная методология включает решения, полученные автором по результатам проведенных исследований.



Рисунок 24 – Общий алгоритм проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов

Работы расчетно-конструкторского блока ориентированы на назначение и расчетное обоснование параметров армирования с последующим определением объема работ по вариантам усиления. Полученные исходные данные служат основой для разработки расчетной схемы и (или) модели сооружения

На рисунке 25 рассматривается сооружение с достигнутыми пороговыми значениями показателей несущей способности или деформативности эксплуатируемой высокой насыпи, на которой в рамках аналитического блока рекомендовано применение армирования с инъектированием твердеющих растворов. Для основной части расчетов параметров армирования рекомендуется использовать модели эксплуатируемой высокой насыпи, разработанные в диссертации. Учитывая специфику решаемых задач, следует отдавать предпочтение моделям, описывающим дифференциальное изменение параметров среды от действующих напряжений.

Для экономического блока проектирования армирования эксплуатируемых высоких насыпей усовершенствована методика оценки экономической эффективности. Результатом оценки является технико-экономическое обоснование предварительно выбранного варианта.

После назначения ключевых проектных решений, конструирования и расчета объемов работ по выбранному способу армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов, выполняется проектирование технологических параметров по алгоритму, представленному на рисунке 26.

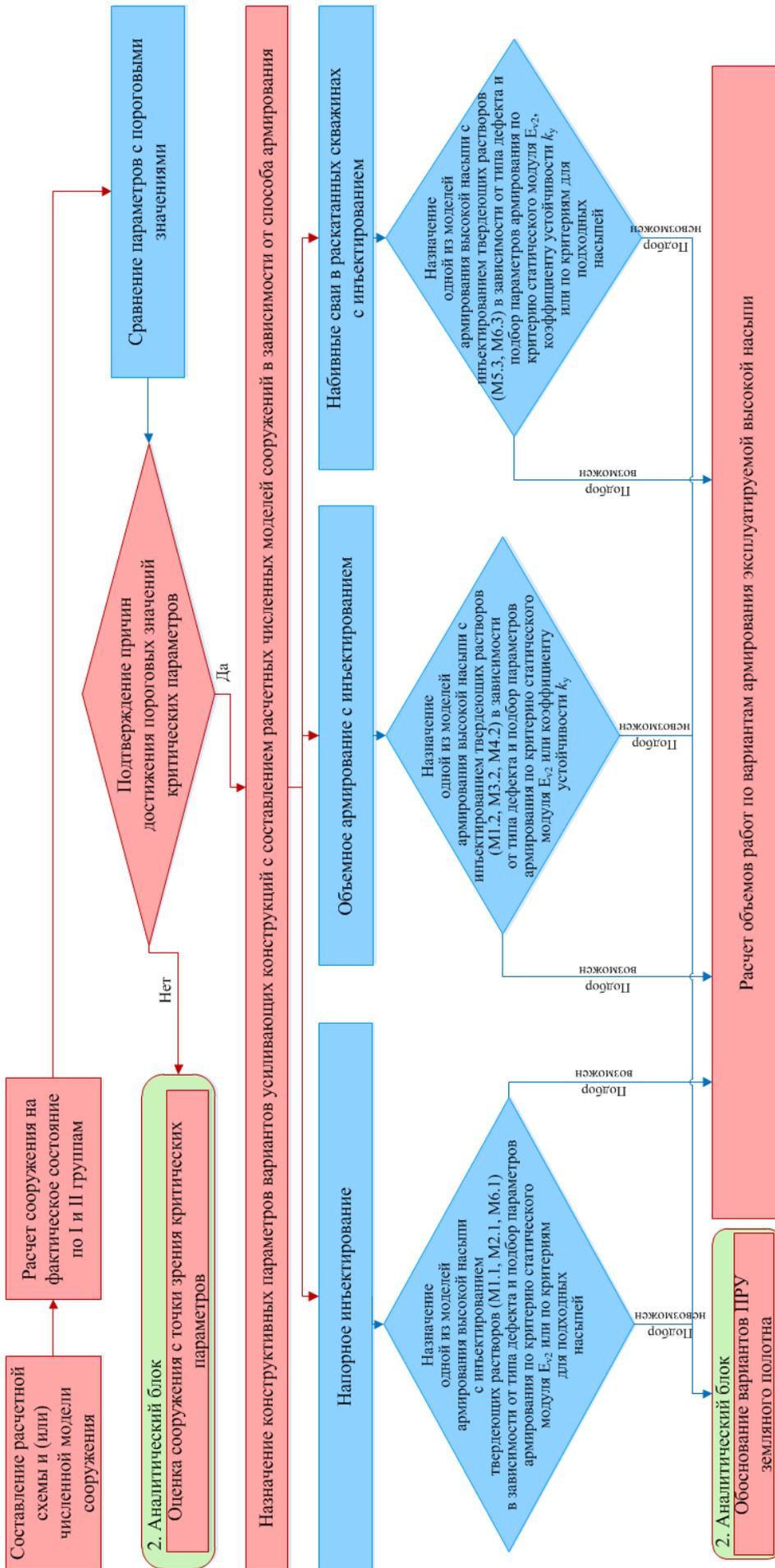


Рисунок 25 – Алгоритм расчетно-конструкторского блока проектирования

В рамках технологического блока проектирования систематизированы практические решения армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов, в том числе разработанные автором.

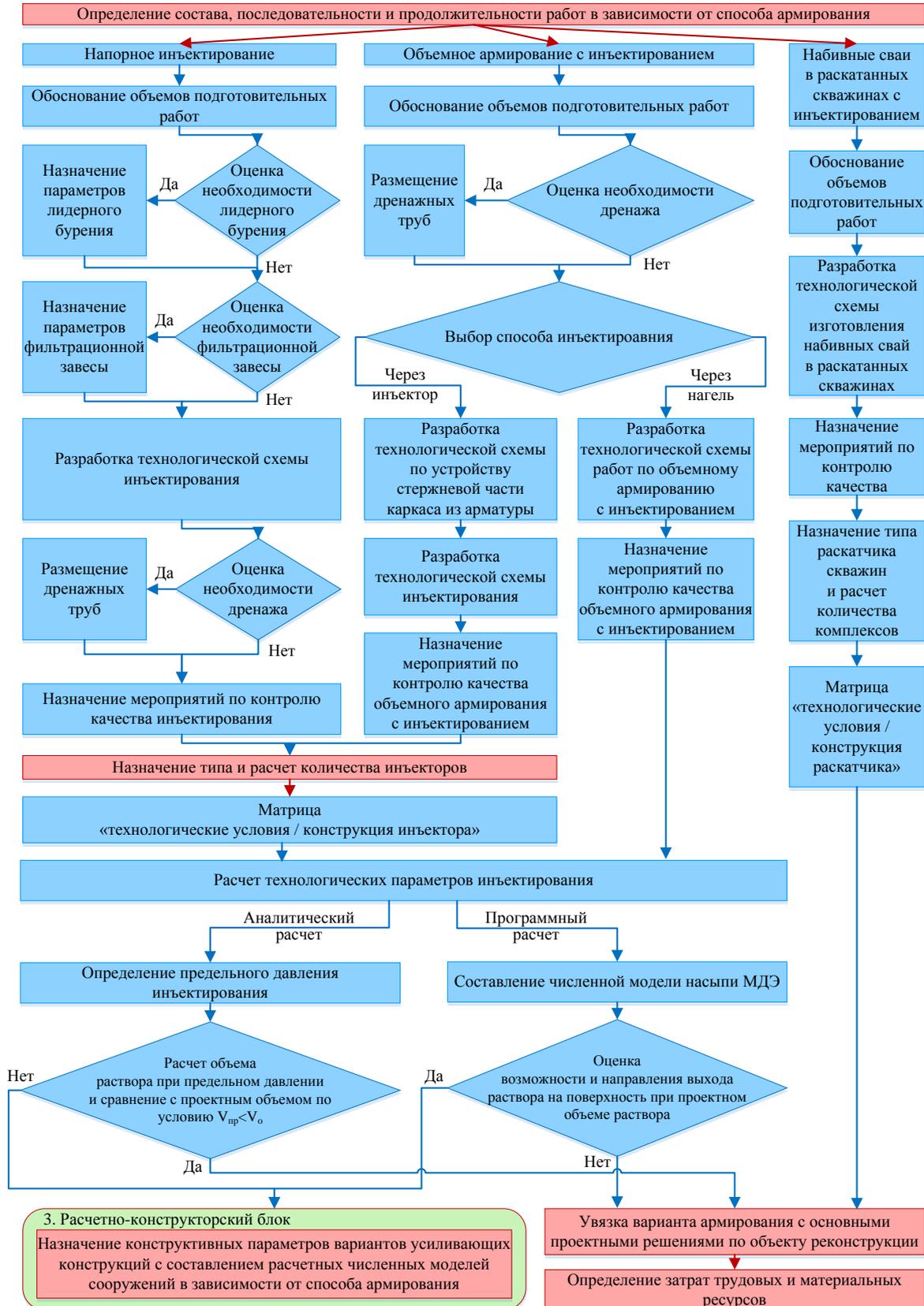


Рисунок 26 – Алгоритм технологического блока проектирования

Отличительной особенностью контрольных работ при усилении грунтов, в том числе при армировании земляного полотна, является требование действующих нормативных документов о назначении работ по опытно-производственному усилению с контролем проектных параметров армирования до выполнения основного объема работ. Данный вид работ представляется возможным интегрировать в блок контроля и выпуска при проектировании армирования эксплуатируемой высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов.

Внедрение предложенных в работе способов армирования эксплуатируемых высоких насыпей выполнено на железнодорожных объектах. Ниже рассмотрены отдельные примеры усиления земляного полотна на объектах железнодорожной инфраструктуры.

*15-ый км перегона Дедюево – Буреничево Западно-Сибирской железной дороги.* Объект представляет собой участок эксплуатируемой высокой насыпи высотой 25 м (рисунок 27). Для рассматриваемого объекта разработаны и реализованы проектные решения армирования с инъектированием твердеющих растворов при одновременном осушении обводненных зон устройством трубчатого дренажа (патент РФ 2277615).

а)



б)



Рисунок 27 – Усиление насыпи на 15-м км перегона Дедюево – Буреничево:  
а – общий вид насыпи; б – инъектирование раствора

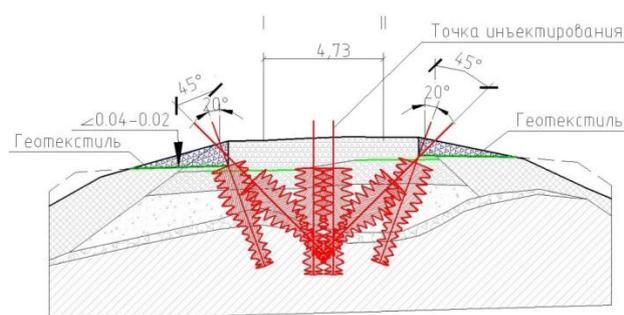
*88-ой км линии Алтайская – Бийск Западно-Сибирской железной дороги.* Объект представляет собой участок эксплуатируемой высокой насыпи высотой 21 м, расположенный на пересечении с периодическим водотоком. По результатам выполненных обследовательских работ разработаны и реализованы работы по усилению земляного полотна и околотрубного пространства способом напорного инъектирования (патент РФ № 2479688). При опытно-производственных работах выполнено практическое внедрение разработанного способа контроля качества, защищенного патентом РФ № 2288995.

*961-ый км ПК 5 Абакумовской дистанции пути Красноярской железной дороги.* Объект представлен эксплуатируемой высокой насыпью, возведенной под однопутную железнодорожную линию, высотой 12,2 м. Проектиро-

вание усиления земляного полотна выполнено объемным армированием в соответствии с разработанным алгоритмом.

146-ой км линии Голуха – Тягун Заринской дистанции пути Западно-Сибирской железной дороги. Объект представлен эксплуатируемой высокой насыпью под двухпутную железнодорожную линию высотой 8,5 м. Усиление земляного полотна запроектировано с использованием способа армирования с инъецированием твердеющих растворов. Примененный способ направлен на снижение тиксотропности грунтов балластного мешка за счет цементирования частиц и пор грунта (омоноличивания) и увеличения прочностных и деформационных характеристик грунтов верхней части земляного полотна (рисунок 28).

а)



б)



Рисунок 28 – Усиление насыпи на 146-м км линии Голуха – Тягун:  
а – конструктивная схема армирования; б – процесс инъецирования

По разработанной методике оценки экономической эффективности инвестиционных затрат при армировании эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов, выполнено сравнение предлагаемых способов с близкими и по решаемым задачам, получены следующие результаты:

- для метода напорного инъецирования грунтов эксплуатируемых высоких насыпей твердеющим раствором при ставке дисконта 20 % значение чистого дисконтированного дохода остается положительной величиной, индекс доходности больше единицы, внутренняя норма доходности 39,27 %, что значительно больше максимальной расчетной ставки дисконта. При этом срок окупаемости реализации усиления грунтов данным методом при различных ставках дисконта (от 10 до 20 %) находится в интервале от 2,96 до 3,72 лет;

- для объемного армирования даже при ставке дисконта 20 % значение чистого дисконтированного дохода остается положительной величиной, индекс доходности больше единицы, внутренняя норма доходности 64,07 %, что значительно больше максимальной расчетной ставки дисконта. При этом срок окупаемости проекта при различных ставках дисконта (от 10 до 20 %)

находится в интервале от 1,78 до 2,04 года.

- для армирования эксплуатируемых высоких насыпей набивными сваями в раскатанных скважинах переменной длины при изменении ставки дисконта (от 10 до 20 %) показатели чистого дисконтированного дохода являются положительной величиной, индекс доходности больше единицы, внутренняя норма доходности больше максимальной расчетной ставки дисконта.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1 По результатам исследования причин возникновения процессов и явлений, влияющих на надежность эксплуатируемых высоких насыпей, установлены три основных вида возможных последствий повышения интенсивности воздействия поездной нагрузки, которые являются проблемными и для обычной эксплуатации. По сети потенциально на эти группы приходится более 30 % всех дефектов и деформаций земляного полотна и более 40 % внезапных деформаций. Обоснована перспективность использования способов и модификаций армирования с инъектированием твердеющих растворов, позволяющих производить работы без или с минимальным ограничением движения.

2 По результатам качественной и количественной оценки зон армирования эксплуатируемых высоких насыпей сформулированы критерии и выполнено теоретическое обоснование выбора способов армирования. Выделено три перспективных способа армирования с инъектированием твердеющих растворов для дальнейших исследований: напорное инъектирование, объемное армирование и армирование набивными сваями в раскатанных скважинах.

Предложен термин «армирование с инъектированием», объединяющий перечисленные способы армирования, дано его определение.

3 Теоретически обоснованы и разработаны восемь моделей армированных с инъектированием твердеющих растворов высоких насыпей, учитывающих параметры и элементы армирования для каждого из способов. Для моделей выполнено поэлементное описание и обоснованы критерии применения. Элементы армирования в моделях подобраны с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния в усиливаемых зонах.

Предложен системный подход к определению параметров усиления с составлением и обоснованием матрицы моделей армирования эксплуатируемых высоких насыпей по способу армирования и виду деформаций.

4 Для определения технологических параметров усиления разработаны теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния

грунтовых массивов в процессе армирования высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов, включающие:

- аналитические решения для расчета напряжений в области инъектированного в грунт раствора, определения предельного давления инъектирования, при котором происходит поднятие поверхности грунтового массива, и определения объема раствора при заданном давлении инъектирования;
- методику для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива, в том числе в процессе инъектирования твердеющих растворов, методом дискретных элементов.

5 Экспериментально определены конструктивные и технологические параметры армирования, которые характеризуют усиленный грунтовой массив в армированной высокой насыпи и позволяют уточнить и дополнить ее модель для компьютерного моделирования.

Качественно и количественно определено влияние армирования с инъектированием на изменение физико-механических характеристик грунтовых массивов.

6 Выполнено численное моделирование эксплуатируемых высоких насыпей, армированных напорным инъектированием и набивными сваями в раскатанных скважинах, по результатам которого:

- модернизированы модели армирования путем введения эквивалентного грунтового слоя (в пределах рабочей зоны) с характеристиками, соответствующими определенному набору параметров армирования;
- установлены зависимости модуля упругости массива в пределах рабочей зоны насыпи от высоты зоны усиления  $h_i$  (при варьировании от 0 до  $z$ );
- установлены критерии «плавности въезда» на подходной насыпи с участком переменной жесткости и условия их применения для детализированных расчетов;
- подтверждена адекватность разработанных моделей.

Подтверждена гипотеза о том, что уплотненные зоны грунта вокруг затвердевшего раствора, образованные при напорном инъектировании и раскатке скважин, существенно влияют на работу армированного массива, что требует их учета в математических моделях как расчетного элемента.

7 Подтверждена возможность определения технологических параметров армирования методом дискретных элементов.

Результаты численного моделирования методом конечных элементов показали близкую сходимость с данными моделирования устойчивости откосов насыпи, полученными с использованием центробежной установки под руководством проф. Т. Г. Яковлевой.

Численное моделирование процесса инъецирования раствора в насыпь позволило выявить места разрыва сплошности структуры грунтового массива, направление выхода раствора на поверхность, а также характер деформаций элементов земляного полотна в случае неограниченного нагнетания твердеющего раствора. Кроме того, численное моделирование показало, что разрыв сплошности структуры грунтового массива насыпи с последующим выходом раствора на поверхность сооружения сопровождается падением давления (без восстановления) инъецируемого раствора, что коррелирует с опытными данными, полученными при усилении реальных объектов.

8 Разработаны методология проектирования и система практических решений при армировании эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов.

Практические решения армирования земляного полотна с инъецированием твердеющих растворов представлены в алгоритме технологического блока проектирования и включают: методику контроля качества усиления; методику подбора армирующих составов для усиления грунтов тела и основания земляного полотна с инъецированием твердеющих растворов; способ ремонта железнодорожного земляного полотна (патент № 2277616); способ упрочнения грунта (патент № 2314388); способ ремонта водопропускной трубы под насыпью (патент № 2479688); способ укрепления откосов земляного полотна (патент № 2507343); способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб (патент № 2588250); способ контроля качества упрочнения грунтового массива (патент № 2288995); инъектор для упрочнения и закрепления грунтов (патент № 41743); забивной инъектор (патент № 78496); раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин (патент № 147223); инъектор для закрепления грунтов (патент № 165656).

9 Полученные результаты исследований внедрены на объектах Западно-Сибирской и Красноярской железных дорог – филиалах ОАО «РЖД», в филиалах ОАО «Росжелдорпроект» и других организациях, выполняющих проектные и строительно-монтажные работы в рассмотренной области, что подтверждается актами внедрения. Подтверждена техническая и экономическая эффективность разработанной на основе проведенных исследований методологии армирования эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов.

### **Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы**

Для дальнейшего развития методологии армирования с инъецированием

ем твердеющих растворов рекомендуется продолжить исследования особенностей изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива эксплуатируемых высоких насыпей при комбинировании разработанных численных моделей. Интерес представляет моделирование процесса армирования с инъектированием твердеющих растворов грунтового массива с оценкой НДС в зоне усиления на основе модифицированной модели дискретной геосреды в различных инженерно-геологических условиях.

Перспективными являются теоретические и экспериментальные исследования по использованию армирования с инъектированием твердеющих растворов для усиления слабых, в том числе оттаивающих, оснований эксплуатируемого земляного полотна.

Повышение эффективности усиления эксплуатируемых насыпей с балластными шлейфами возможно на основе исследований по определению их физико-механических характеристик, особенностей их формирования и учета влияния на НДС грунтового массива.

Для возможности широкого практического использования разработанной методологии проектирования армирования с инъектированием твердеющих растворов необходимо включить результаты исследований в нормативно-техническую документацию.

### **Список работ по теме диссертации:**

*Публикации в ведущих научных рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России*

1. Ланис, А. Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 32–34.
2. Ланис, А. Л. Исследование динамических воздействий автотранспортом на дорожную одежду, закрепленную синтетическим полимером / А. Л. Ланис, Ю. Р. Смолин, Д. А. Разуваев // Вестник ТГАСУ. – № 2. – 2012. – С. 230–234.
3. Ланис, А. Л. Модификация модели геосреды для решения задач механики грунтов методом дискретных элементов / Г. Н. Хан, А. Л. Ланис // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1. – С. 273–281.
4. Ланис, А. Л. Численное моделирование нагружения насыпного массива / А. Л. Ланис, Г. Н. Хан // Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 55–58.
5. Ланис, А. Л. К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины / А. Л. Ланис, П. О. Ломов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 92–97.
6. Ланис, А. Л. Сопряжение подходов насыпей с мостами и путепроводами / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, П. О. Ломов // Вестник СибАДИ. – 2016. – № 2 (48). – С. 110–120.
7. Ланис, А. Л. Усиление грунтов земляного полотна на подходах к мостам и путепроводам / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 97–104.
8. Ланис, А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием / А. Л. Ланис // Известия Транссиба. – 2016. – № 3 (27). – С. 117–124.

9. **Ланис, А. Л.** Устройство оснований методом раскатки скважин с инъектированием твердеющего раствора / **А. Л. Ланис**, А. М. Попов, П. О. Ломов // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 7. – С. 29–38. Издание входит в международную базу данных СА(pt) (Chemical Abstracts).

10. **Ланис, А. Л.** Оптимальное управление поставками и запасами материальных ресурсов на строительстве линейно-распределенных объектов / В. С. Воробьев, **А. Л. Ланис**, Ю. В. Попова // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 7. – С. 100–107. Издание входит в международную базу данных СА(pt) (Chemical Abstracts).

11. **Ланис, А. Л.** Повышение качества усиления грунтовых массивов по результатам геотехнического мониторинга / **А. Л. Ланис**, Д. А. Разуваев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (43). – С. 5–11.

12. Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине / **А. Л. Ланис**, В. С. Воробьев, Д. А. Разуваев, П. О. Ломов // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 9 (705). – С. 31–40. Издание входит в международную базу данных СА(pt) (Chemical Abstracts).

13. **Ланис, А. Л.** Определение характеристик балластных шлейфов в условиях Западно-Сибирской железной дороги / **А. Л. Ланис**, Л. О. Беляков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С. 72–81.

14. **Ланис, А. Л.** Результаты моделирования эксплуатируемых насыпей при напорном инъектировании твердеющих растворов / **А. Л. Ланис** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (46). – С. 43–50.

15. **Ланис, А. Л.** Армирование основной площадки высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов / **А. Л. Ланис** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (50). – С. 38–46.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science*

16. **Lanis, A. L.** Deformation properties of a subgrade in structures reinforced with full displacement piles / **A. Lanis**, D. Razuvaev, P. Lomov // MATEC Web of Conferences. X International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». – 2018. – Vol. 216. – 01006.

17. **Lanis, A. L.** Results of modeling the behavior of the subgrade with pressure injection of solidifying solutions // **A. Lanis** // MATEC Web of Conferences. Siberian Transport Forum – TransSiberia. – 2018. – Vol. 239. – 05006.

18. **Lanis, A. L.** Systematization of features and requirements for geological survey of railroad subgrades functioning in cold regions / **A. L. Lanis**, D. A. Razuvaev // Sciences in Cold and Arid Regions. – Vol. 9, Iss. 3, June, 2017. – P. 205–212.

*Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях*

19. Стабилизация деформаций железнодорожной насыпи на подходе к мосту через р. Камышанка / М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин, П. З. Мокин, И. А. Мельников, **А. Л. Ланис** // Вузы Сибири и Дальнего Востока Транссибу : материалы регион. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 337–343.

20. Об использовании метода напорной инъекции для уплотнения грунтового основания деформируемых зданий / М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин, П. С. Ваганов, **А. Л. Ланис** // Тр. Междунар. геотехн. симпозиума (16 сентября 2003 г.). – СПб., 2003. – С. 146–148.

21. **Ланис, А. Л.** Упрочнение грунтов методом высоконапорной инъекции твердеющего раствора / **А. Л. Ланис** // Особенности строительства и эксплуатации объектов и повышение их надежности в условиях Сибири : тр. науч.-техн. конф. – Новосибирск : СИБЦНИИТС, 2004. – С. 53–55.

22. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий / М. Я. Крицкий, В. И. Пусков, В. Ф. Скоркин, **А. Л. Ланис** // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь, 2004. – Т. II. – С. 47–53.

23. **Ланис, А. Л.** Диагностика состояния высоких насыпей над водопропускными трубами и опыт стабилизации их деформаций / М. Я. Крицкий, Н. В. Астахов, **А. Л. Ланис** // Тр. междунар. конф. «Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов». – Алматы, 2004. – С. 294–297.

24. **Ланис, А. Л.** Упрочнение грунтов основания методом высоконапорной инъекции / **А. Л. Ланис** // Материалы междунар. науч.-практ. конф. (19–17 сентября 2004 г.). – Пенза, 2004. – С. 150–153.

25. Упрочнение грунтов методом напорной инъекций / В. И. Пусков, М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин, **А. Л. Ланис** // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 61, т. 2. – Київ : НДІБК, 2004. – С. 51–58.

26. **Lanis, A. L.** Causes of deformations in engineering structures in the city of Novosibirsk and methods of their stabilizations / М. Kritsky, S. Kritsky, **A. Lanis** // The Proceedings of the International Geotechnical Symposium «Geotechnical Aspects of Natural and Man-Made Disasters». – Astana, Kazakhstan Geotechnical Society, 2005. – P. 252–255.

27. **Ланис, А. Л.** Опыт упрочнения высоконапорной инъекцией твердеющего раствора / М. Я. Крицкий, В. И. Пусков, **А. Л. Ланис** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2005. – Вып. 12. – С. 95–102.

28. **Ланис, А. Л.** Геотехническое обоснование упрочнение грунтовых оснований методом высоконапорной инъекции / М. Я. Крицкий, **А. Л. Ланис** // Город и геологические опасности : материалы междунар. конф. (17–21 апреля 2006 г.). – СПб., 2006. – Ч. II. – С. 78–86.

29. **Ланис, А. Л.** Определение прочностных характеристик грунтов земляного полотна, упрочненного методом напорной инъекции / Ю. П. Смолин, **А. Л. Ланис** // Тр. междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – МГУПС, 2008. – С. 140–143.

30. **Ланис, А. Л.** К вопросу усиления грунтов основания земляного полотна железных дорог на карстоопасных участках / **А. Л. Ланис**, В. Ф. Скоркин // Тр. междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2009. – С. 93–97.

31. **Ланис, А. Л.** Способ усиления земляного полотна методом напорной инъекции / **А. Л. Ланис** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 23. – С. 75–77.

32. **Ланис, А. Л.** Диагностика и контроль качества упрочнения грунтового массива методом напорной инъекции / **А. Л. Ланис** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. – Вып. 23. – С. 98–101.

33. **Ланис, А. Л.** Восстановление эксплуатационной надежности земляного полотна дорог / **А. Л. Ланис**, С. А. Овчинников // Материалы междунар. конф. «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – СПб. : Изд-во ПНИПУ, 2012. – С. 189–195.

34. **Ланис, А. Л.** Усиление грунтов земляного полотна армирующими конструкциями / **А. Л. Ланис**, С. А. Овчинников // Тр. IX Междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2012. – С. 111–113.

35. **Ланис, А. Л.** К вопросу разработки конструкции участка насыпи переменной жесткости на подходах к мосту / **А. Л. Ланис**, К. В. Востриков, Д. А. Разуваев // Тр. IX Междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2012. – С. 185–188.

36. **Ланис, А. Л.** К вопросу усиления земляного полотна железных дорог армированием / **А. Л. Ланис** // Тр. междунар. конф. «Роль путевого хозяйства в инфраструкту-

ре железнодорожного транспорта». – Саранск : ГУП РМ «Красный Октябрь» ПТКБ ЦП ОАО «РЖД», 2012. – С. 132–137.

37. Ланис, А. Л. Армирование грунтов раскаткой скважин / А. Л. Ланис, П. О. Ломов, О. В. Иванов // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2012. – Ч. 1. – С. 342–349.

38. Ланис, А. Л. К вопросу оптимизации объемов усиления земляного полотна армированием / А. Л. Ланис // Материалы междунар. конф. «Путь XXI века». – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 125–132.

39. Ланис, А. Л. Методика упрочнения земляного полотна объемной армирующей конструкцией / А. Л. Ланис, С. А. Овчинников // Тр. XI Междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2014. – С. 153–156.

40. Улучшение физико-механических характеристик грунтов инъектированием / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, В. Ф. Скоркин, П. О. Ломов // Политранспортные системы : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2014. – С. 74–80.

41. Ланис, А. Л. К вопросу проектирования усиления земляного полотна методом напорной инъекции / А. Л. Ланис, Л. О. Беляков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Седьмой Междунар. конф. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – Т. 1. – С. 419–423.

42. Ланис, А. Л. Инженерная подготовка основания при реконструкции земляного полотна на подходах к мосту / А. Л. Ланис, С. А. Овчинников // Тр. XIII Междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2016. – С. 90–93.

43. Ланис, А. Л. К вопросу повышения устойчивости земляного полотна армированием / А. Л. Ланис, К. В. Востриков // Тр. XIII Междунар. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – М. : МГУПС, 2016. – С. 87–89.

44. Ланис, А. Л. К вопросу выполнения расчетов устойчивости откосов железнодорожных насыпей в соответствии с требованиями СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм» / А. Л. Ланис, К. В. Востриков, Л. О. Беляков // Тр. IX Междунар. конф. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2016. – С. 106–113.

45. Ланис, А. Л. К вопросу усиления грунтов земляного полотна армирующими конструкциями / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, П. О. Ломов // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2016. Транспорт, наука, образование, производство». – Ростов н/Д : Изд-во РГУПС, 2016. – Т. 1 – С. 86–90.

46. Ланис, А. Л. Инженерное обследование земляного полотна на подходах к мостам участка Лопча – Хорогочи Дальневосточной железной дороги / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев // Тр. IX Междунар. конф. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2017. – С. 113–117.

#### *Монографии*

47. Ланис, А. Л. Усиление земляного полотна автомобильных дорог : [монография] / М. Я. Крицкий, А. Л. Ланис // Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. – 182 с.

#### *Патенты*

48. Пат. 47223 Российская Федерация. Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин / Ланис А. Л., Ломов П. О., Скоркин В. Ф. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.

49. Пат. 41743 Российская Федерация. Инъектор для упрочнения и закрепления грунтов / **Ланис А. Л.**, Крицкий М. Я., Скоркин В. Ф., Воронцов В. Б. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 10.11.2004, Бюл. № 31.

50. Пат. 78496 Российская Федерация. Забивной инъектор / **Ланис А. Л.**, Крицкий М. Я. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 27.11.2008, Бюл. № 33.

51. Пат. 165656 Российская Федерация. Инъектор для закрепления грунтов / **Ланис А. Л.**, Беляков Л. О., Овчинников С. А. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 27.10.2016, Бюл. № 30.

52. Пат. 2277616 Российская Федерация. Способ ремонта железнодорожного земляного полотна / **Ланис А. Л.**, Крицкий М. Я., Скоркин В. Ф. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 10.06.2006, Бюл. № 16.

53. Пат. 2507343 Российская Федерация. Способ укрепления откосов земляного полотна / **Ланис А. Л.**, Овчинников С. А., Скоркин В. Ф. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 10.10.2013, бюл. № 28.

54. Пат. 2288995 Российская Федерация. Способ контроля качества упрочнения грунтового массива / **Ланис А. Л.**, Крицкий М. Я., Скоркин В. Ф. ; заявитель и патентообладатель ООО НПК «Совстройтех». – Оpubл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

55. Пат. 2314388 Российская Федерация. Способ упрочнения грунта / **Ланис А. Л.**, Крицкий М. Я. ; заявитель и патентообладатель ООО НПК «Совстройтех». – Оpubл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

56. Пат. 2479688 Российская Федерация. Способ ремонта водопропускной трубы под насыпью / **Ланис А. Л.** ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 20.04.2013, Бюл. № 11.

57. Пат. 2588250 Способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб / **Ланис А. Л.**, Карелина Е. Л. ; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Оpubл. 27.06.2016, Бюл. № 18.

Ланис Алексей Леонидович

## **Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и  
проектирование железных дорог

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора технических наук

---

Подписано к печати «19» сентября 2019 г.

2,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 3482

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»  
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191 тел. (383) 328-03-81. e-mail: [bvuv@stu.ru](mailto:bvu@stu.ru)

---