

# Инновационный подход к реконструкции земляного полотна



Александр ГОРЛОВ

Aleksandr V. GORLOV

## An Innovative Approach to Roadbed Reconstruction

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 116)

**Статья знакомит с исследованиями в области реконструкции и усиления земляного полотна железных дорог, созданной с участием автора методикой расчётов и проектирования нагельно-сетчатых конструкций, укрепляющих поверхностные откосные части насыпи. Определены рациональные размеры нагелей, предложены инновационные технические решения для земляного полотна под строительство вторых путей, с использованием математического и физического центробежного моделирования. Разработаны лабораторная установка и методика стендовых испытаний армирующих элементов для разных типов нагельных конструкций.**

**Ключевые слова:** железная дорога, земляное полотно, нагель, инновационные конструкции, моделирование, проектирование, стендовые испытания, реконструкция, методы расчёта, армирующие элементы.

*Горлов Александр Вячеславович – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

**П**овышение надежности инфраструктуры железнодорожного и автомобильного транспорта и обеспечение безопасности движения за счёт внедрения инновационных и ресурсосберегающих технических решений – грунтово-нагельных систем при строительстве и реконструкции объектов земляного полотна (в том числе расположенного на сейсмически активных территориях) является востребованной технологией.

Многолетние исследования и опытно-производственные работы, выполненные в нашей стране и за рубежом, показали эффективность применения армогрунтовых сооружений и нагельно-сетчатых конструкций для усиления земляного полотна. Тем не менее анализ показывает, что недостаточно изучено напряженное состояние армированного грунта, а также мало внимания уделялось исследованиям деформативности армированных геоматериалами грунтовых конструкций.

Основным показателем надёжности строительных объектов является невозможность превышения в них предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчётных нагрузок в течение прогнозного срока службы [1].

В федеральных нормативных документах для оценки надёжности земляного полотна предлагается применять коэффициент запаса, который зависит от категории линии.

Устойчивость откосов определяется путем сопоставления значений расчётных коэффициентов запаса (устойчивости)  $K_s$  с допускаемым коэффициентом запаса (устойчивости)  $[K_s]$  в соответствии с требованиями СП 32–104–98. Однако в нормативах не учитывается деградация свойств материалов во времени, влияние окружающей среды и т. д. Возникает необходимость учёта потерь поперечного сечения арматуры в процессе эксплуатации.

Для полимерных армоэлементов рабочее усилие не может определяться разрывом при растяжении. Оно мотивировано деформациями, возникающими после завершения строительства, или нагрузками в армоэлементах после релаксации материала под влиянием постоянно действующих напряжений.

Принимая во внимание, что никакой материал не является неизменным, актуальными остается оценка возможных изменений его характеристик во времени и установка коэффициентов, учитывающих эти изменения.

Чтобы оценить рабочее усилие на армоэлементе в течение выбранного расчётного срока службы, надо дать информацию относительно развития деформации при ползучести.

Также актуальной остаётся задача оценки вибродинамического воздействия поездного состава на армогрунтовое сооружение.

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА НАГЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При проектировании усиления земляного полотна следует различать особенности расчётов грунтовых анкеров от нагелей. Отличительной чертой нагелей от схожих удерживающих конструкций является совместная работа грунта и элемента крепления, при которой отсутствует передача выдергивающей нагрузки от закрепляемой призмы обрушения и происходит связывание грунтового массива по всей длине [1].

Среди грунтовых нагельных систем можно выделить два основных типа:

- армирование откоса/склона;
- закрепление откоса/склона нагелями с облицовкой сеткой.

Анализ отечественной литературы о производстве грунтовых нагелей показал, что процесс подбора таких параметров нагельного крепления, как шаг в вертикальном и горизонтальном направлениях, диаметр, угол наклона и длина нагелей, должен осуществляться путем расчёта по двум группам предельных состояний (несущей способности и деформативности). При этом отсутствует методика расчёта указанных параметров, а приводятся лишь рекомендуемые диапазоны их значений, которые требуют уточнения в зависимости от грунтовых условий и геометрии укрепляемых сооружений, также целесообразна разработка рациональных значений этих параметров. Для определения условий функционирования целесообразно применение физического центробежного моделирования.

В руководящих документах [1–3] представлена только методика выполнения расчёта по первой группе предельных состояний, исходя из условий устойчивости армогрунтовой стены против сдвига по подошве и опрокидывания относительно точки пересечения поверхности откоса с основанием.

Согласно [3, 4] нагельное крепление представляет собой геотехническую конструкцию, предназначенную для обеспечения устойчивости склонов, откосов насыпей и выемок, вертикальных и наклонных стен котлованов методом установки в грунтовой массив системы армирующих элементов (стальных стержней, труб, композитных элементов и т. п.). Нагели связывают грунтовой массив по всей своей длине, образуя самонесущую гравитационную подпорную стену из армированного грунта.

Нагельное крепление не требует возведения массивной ограждающей конструкции (свайная, шпунтовая, железобетонная и прочие подпорные стенки), его применяют, когда естественные откосы невозможны или нецелесообразны по условиям существующей застройки.

Отсутствуют схемы вероятных разрушений конструкций нагельного крепления, которые необходимо учитывать при расчётах. Поскольку крепление представляет



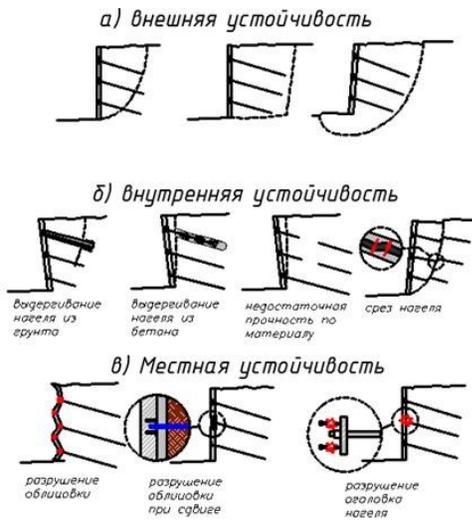


Рис. 1. Основные причины разрушения грунтовой нагельной системы.

собой армогрунтовую систему, то и основные причины ее разрушения подобны наблюдаемым с армогрунтовыми подпорными стенками (рис. 1).

И соответственно методика расчёта должна включать следующие этапы:

- определение параметров армирования массива (количество ярусов, шаг установки, длина, наклон, диаметр нагелей) из условия обеспечения совместной работы нагельных элементов и грунта (внутренняя устойчивость);
- проверка длины нагелей из условия устойчивости армированного массива на

опрокидывание и сдвиг по основанию (внешняя устойчивость);

- определение характеристик защитного покрытия стенки (откоса) и проверка шага расстановки нагелей из условия предупреждения локального вывала грунта между нагелями.

Нами разработаны новая модель и расчётная схема внутренней устойчивости нагельного крепления.

Оценка внутренней устойчивости проверяется, исходя из двух типов поверхностей скольжения – равной и ломаной.

Расчётом оценивается соотношение сил сопротивления и сдвига, действующих на поверхность скольжения. Кроме того, используются коэффициенты надёжности, которые не учитываются в российских нормах, но присутствуют в зарубежных методиках.

Для каждого нагеля оцениваются три параметра:

- сопротивление разрыву;
- сопротивление выдёргиванию из грунта;
- несущая способность оголовка нагеля.

Таким образом, для каждой поверхности скольжения определяется критический параметр для нагеля (по прочности, сопротивлению выдергиванию, несущей способности оголовка) (рис. 2). Несущая способность рассчитывается с учётом положения

Рис. 2. Распределение силы растяжения вдоль нагеля.

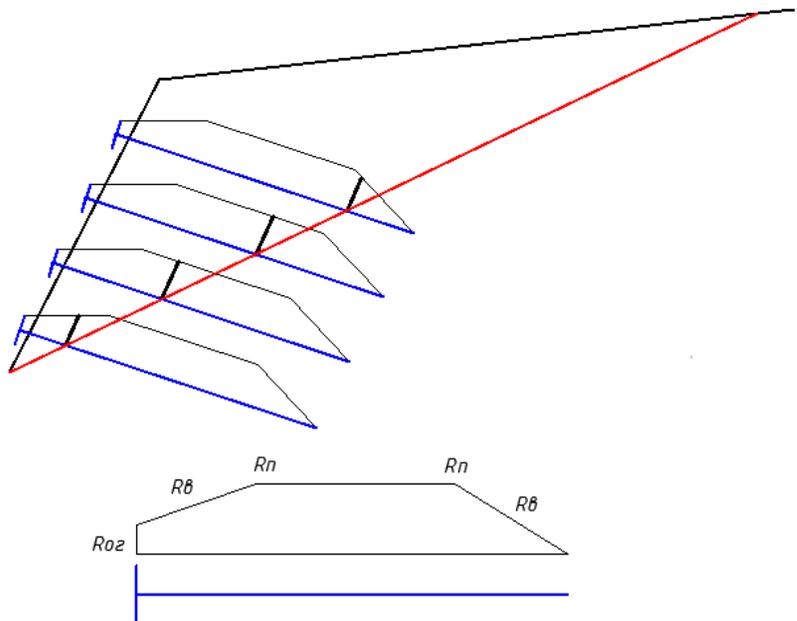




Рис. 3. Общий вид объекта.

его линии пересечения с поверхностью скольжения. Нагель, который находится перед поверхностью скольжения, в расчёте не учитывается. Если поверхность скольжения пересекает нагель, то несущая способность определяется по формуле

$$F = \min(R_B \cdot x, R_{II}, R_{ог} + R_B \cdot y), \quad (1)$$

где  $x$  — длина нагеля позади поверхности скольжения в направлении массива грунта;

$y$  — длина нагеля напротив поверхности скольжения;

$R_{ог}$  — допустимая нагрузка на оголовок;

$R_{II}$  — прочность нагеля;

$R_B$  — сопротивление выдергиванию.

За рубежом накоплен большой опыт применения анкерных и нагельных конструкций для стабилизации и усиления земляного полотна [5].

В отечественной практике имеется опыт эффективного применения таких конструкций для стабилизации земляного полотна железных дорог.

В июле-августе 2013 года в границах станции Владимир Горьковской железной дороги проводились работы по восстановлению земляного полотна после оползания откосов выемки, которое произошло в июле 2013 года после продолжительного ливня [6]. Решением вопроса стали выпуск скопившейся воды в откосе выемки с использованием поперечных дренажных прорезей и укрепление откосов анкерными конструкциями, представляющими собой два яруса железобетонных плит, размещенных вдоль откоса, с анкерами длиной 25 м (рис. 3) [7]. Предварительное натяжение в анкерах не производилось.

Еще в одном случае специалистами МИИТ были проведены геотехнические

расчёты для оценки состояния деформирующегося земляного полотна на участке Таёжный—Камарчага Красноярской железной дороги и обоснования возможности его усиления нагельными конструкциями [8]. На основе материалов инженерных изысканий и проектной документации выполнен расчётный анализ для установления причин и условий деформирования длительно эксплуатируемой двухпутной насыпи высотой до 20 м.

### УСИЛЕНИЕ НАСЫПЕЙ НАГЕЛЬНО-СЕТЧАТЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Длительно эксплуатируемые насыпи, как правило, повсеместно имеют развитые балластные шлейфы, которые образовались с течением времени при выполнении ремонтов и текущего содержания пути, часто с завышенной крутизной откосов, что может привести к сплывам и деформациям под воздействием природных и техногенных факторов.

Деформативность насыпей с балластными шлейфами во многом определяется влажностным режимом.

Деформации откосных частей насыпей, выемок и склонов могут быть связаны с недостаточной общей и местной устойчивостью.

Традиционным способом стабилизации и усиления таких насыпей является срезка шлейфов, уположение откосов и отсыпка контрбанкетов из дренирующих грунтов. Несмотря на надёжность этих мероприятий, они обладают существенными недостатками: требуют больших объёмов дефицитных дренирующих грунтов, отвода значительной площади под основания



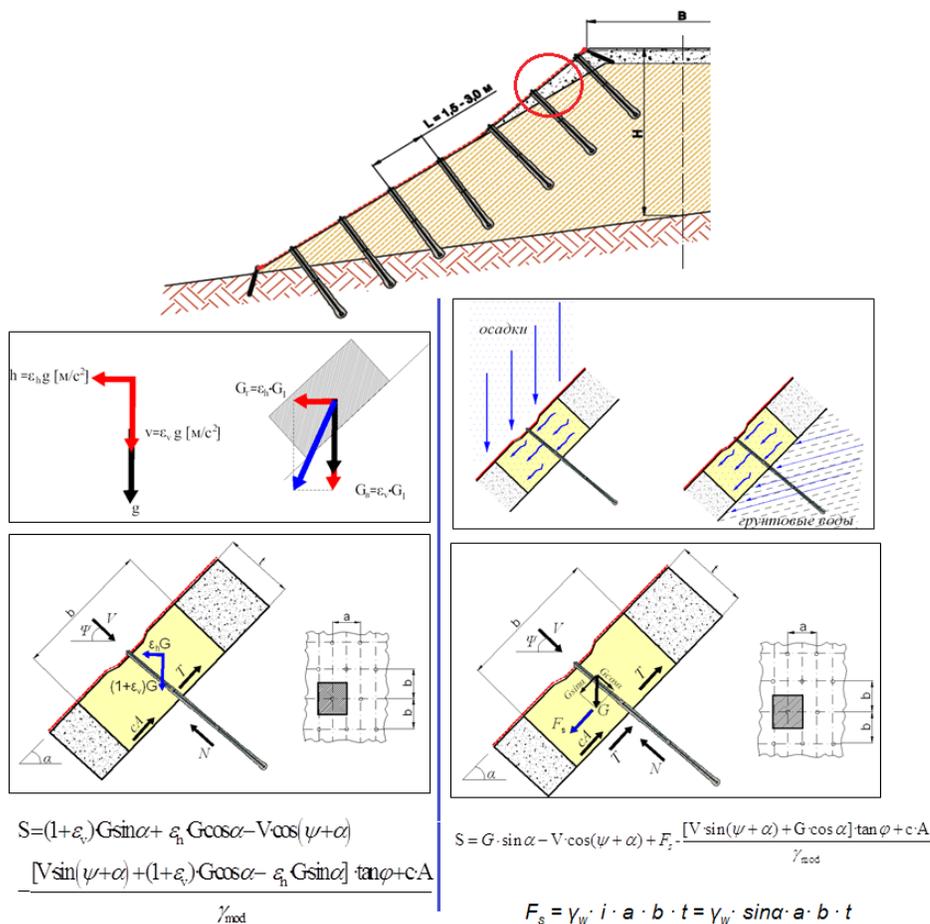


Рис. 4. Расчётные схемы для усиления земляного полотна железных дорог анкерными и нагельными конструкциями.

контрбанкетов, удлинения водопропускных труб, переноса коммуникаций, продолжительных «окон».

На основе выполненных исследований в МИИТ на кафедре «Путь и путевое хозяйство» ранее были созданы способы усиления земляного полотна железных дорог армогрунтовыми конструкциями и предложены технические указания, рекомендации, альбомы групповых технических решений, в числе которых и касающиеся анкерных конструкций.

Альтернативой им может послужить нагельно-сетчатое крепление откосов насыпей, выемок, надтрубной зоны.

Нагельно-сетчатая конструкция представляет собой систему защитного покрытия откоса или склона путём его закрепления высокопрочной металлической стальной сеткой через опорные зубчатые пластины при помощи нагелей, установленных

с заданным шагом по вертикали и горизонтали.

Необходимая плотность армирования определяется расчётами методом конечных элементов.

Применительно к местной устойчивости, в особенности на участках с предопределённой поверхностью скольжения (насыпи с балластными шлейфами, поверхностные слои выемок), специалистами МИИТ разработана методика проектирования и расчётов усиления земляного полотна анкерными и нагельными конструкциями (рис. 4), в которой предусмотрено воздействие неблагоприятных факторов – в том числе землетрясений, инфильтрации атмосферных осадков и грунтовых вод.

В отличие от существующей методики расчёта нагельной крепи учитывается:

- шаг расстановки нагелей в продольном и поперечном направлении;

- различные траектории (механизм) возможных смещений поверхностных слоев насыпи (балластных шлейфов);
- наличие облицовки (сетки);
- влияние внешних факторов на поведение конструкции.

При рассмотрении неустойчивых участков откосов или склонов во внимание берутся две расчётные схемы возможного смещения:

- траектория смещения единого участка массива грунта;
- клиновидные траектории смещения отдельных неустойчивых участков массива грунта.

При оценке равновесия выделенного участка с учётом выполнения условий прочности теории Кулона-Мора величина удерживающей силы нагеля  $S$  с сопутствующей силой предварительного натяжения  $V$  может быть представлена расчётной формулой, критерием для которой является превышение величины суммарной удерживающей силы над сдвигающей, с учетом коэффициентов запаса.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЛОТНА ПОД ВТОРЫЕ ПУТИ

В связи с этим целесообразно рассмотреть и возможность применения нагельных конструкций не только как основного способа усиления, но и как вспомогательной конструкции при устройстве армогрунтовых стен усеченных размеров.

Предложено инновационное техническое решение усиления эксплуатируемого земляного полотна железных дорог при его реконструкции под вторые пути за счёт уширения основной площадки, уположения откоса, устройством армогрунтовой стены с минимальным развитием ее основания и применением нагельных конструкций, которые укрепляют существующую откосную часть земляного полотна и соединяются армирующими элементами поддерживающего сооружения.

При этом решается проблема усиления нестабильных откосных частей, повышается устойчивость земляного полотна в целом, сокращается объем грунта и количество армирующих материалов в подпорной стене. В контексте обозначенной задачи предложен вариант, который позволяет обеспечить экономичность и повы-

сить эффективность реконструкции земляного полотна в стесненных условиях [9].

На основе анализа инженерных изысканий и обследования натуральных объектов, а также нормативной базы была выполнена оценка состояния земляного полотна, определены условия и причины его деформирования, разработана расчётная схема для типового профиля длительно эксплуатируемой насыпи. Подобраны параметры конструкции с учётом использования современных материалов армирования.

Использованные методы исследования: математическое моделирование (инженерные расчёты), макетирование и геотехническое физическое центробежное моделирование.

Земляное полотно было представлено эксплуатируемой насыпью с развитыми балластными шлейфами. Для установления количественных показателей характерного поперечного профиля изучены материалы анализа инженерно-геологических обследований по 183 поперечным профилям 73 эксплуатируемых насыпей. Обследованные насыпи высотой от 1 до 20 м имели возраст от 30 до 100 лет, сооружались из местных грунтов – суглинков и располагались на прочном основании. В качестве примера выбрана характерная насыпь из глинистых грунтов высотой 12 м.

Ради экономии пространства и материалов нами разработана конструкция, представляющая собой армогрунтовую подпорную стену, закрепленную в откосе с помощью нагелей (анкеров), внедренных в тело насыпи. Нагели выполняют две функции в конструкции:

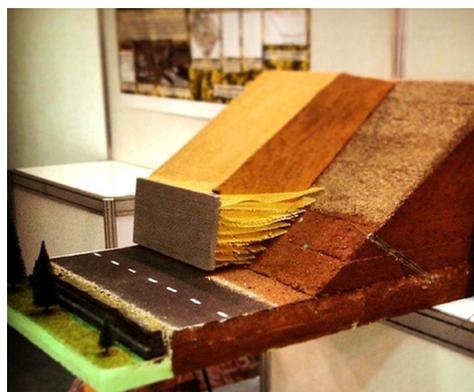
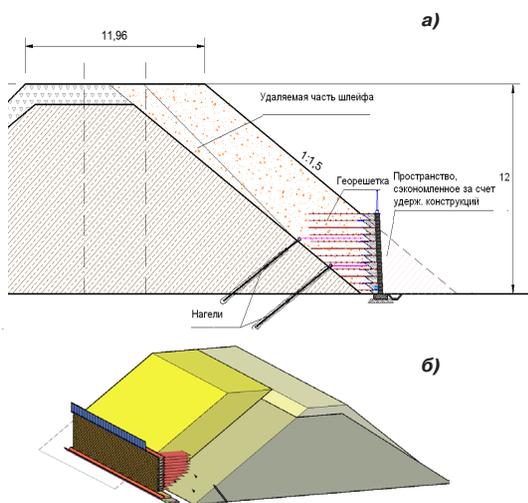
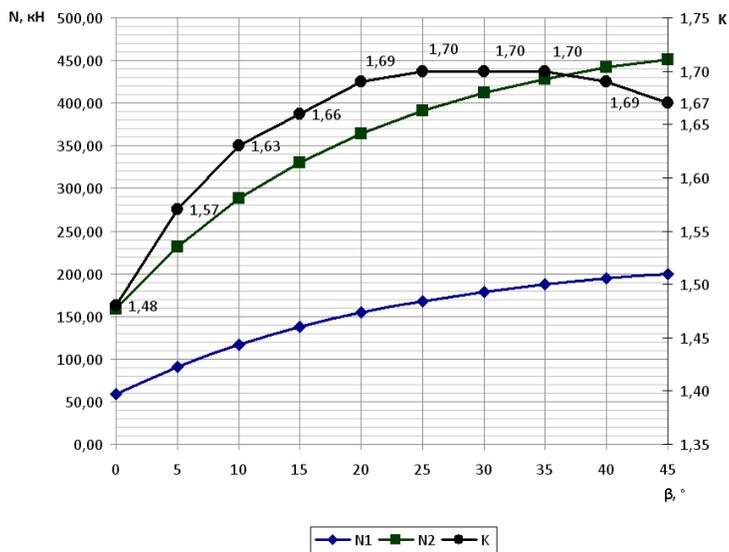
- повышение устойчивости откоса насыпи;
- удержание армогрунтовой подпорной стены от опрокидывания.

Поскольку армогрунтовая подпорная стена расположена непосредственно у основания насыпи и в ее нижней части длина армирующих элементов ограничена откосом, то нужна дополнительная удерживающая сила для закрепления подпорной стены против сдвига и опрокидывания. Такую дополнительную силу создают нагели.

Расчётами была проверена устойчивость насыпи в построечный период после усиления откоса нагелями. Параметры нагелей подбирались с учётом зависимостей расчёт-



**Рис. 5. График зависимости коэффициента устойчивости  $K$  от угла наклона нагелей и усилий в нагелях  $N$  от угла наклона нагелей  $\beta^\circ$ .**



**Рис. 6. Конструкция в трех измерениях: а) поперечный разрез насыпи; б) математическая объемная модель; в) общий вид макета.**

ных коэффициентов устойчивости насыпи  $K$  и усилий  $N$ , возникающих в нагелях от угла их наклона к горизонту. По результатам анализа графиков (рис. 5) был принят угол наклона нагелей 35 град. Поскольку при таком угле возникают наибольшие усилия в нагелях, достигается максимальный коэффициент устойчивости и обеспечивается наиболее эффективная работа конструкции.

Таким образом, была впервые предложена конструкция усиления насыпи под второй путь (рис. 6), которая рекомендуется для применения в стесненных условиях при строительстве и реконструкции земляного полотна железных дорог; при усилении откосных частей земляного полотна без под-

резки, а также при укреплении оползневых склонов. Конструкция является технологичной и может возводиться с полевой стороны дороги.

По результатам расчетов и проектирования насыпи, усиленной армогрунтовой стеной и нагельными конструкциями, был изготовлен ее макет, который был представлен по разделу «Экология и рациональное землепользование» на выставке научно-технического творчества молодежи (НТТМ) на ВДНХ в Москве в 2014 году и награжден медалью [10].

В дальнейшем работоспособность конструкции предполагается проверить методом центробежного моделирования на геотехнической центрифуге МИИТ.

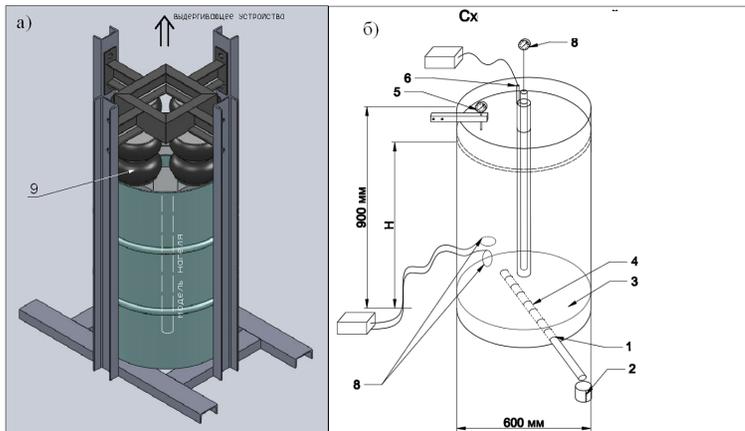


Рис. 7. Схема установки и измерительной системы: а) общий вид; б) измерительная система. 1 – отверстие для вывода жидкости; 2 – мерная ёмкость; 3 – дренаж; 4 – перфорированная трубка; 5, 6 – датчик перемещений; 7 – рама; 8 – датчик давления; 9 – пневматические домкраты.

Таблица 1

**Сопrotивление по боковой поверхности анкера/нагеля в зависимости от типа грунта**

Тип грунта	Сопrotивление по боковой поверхности $q_{sk}$ , кПа
Средний и крупный гравий	200
Песок, гравелистый песок	150
Супесь, суглинок, глина	100

**РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Для оценки параметров взаимодействия для разных конструкций нагелей и грунтовых условий проводятся испытания на выдергивание с учётом различного напряженного состояния.

Испытания на выдергивание моделируют реальные условия работы нагеля в грунте.

Целью испытаний, проведенных на стенде, является изучение на физических моделях зависимости сопротивления выдергиванию нагельного крепления от основных параметров: типа и показателя текучести грунта, диаметра нагеля и его обжатия окружающим грунтом.

Для понимания механизма взаимодействия по поверхности армирующий элемент-грунт планируется провести испытания на выдергивание. Они должны моделировать реальные условия работы нагеля в грунте.

Анализ существующих методик расчёта несущей способности нагелей по грунту показал, что они оценивают только нагели с цементным телом вокруг металлического элемента. Однако в ряде случаев целесообразно применение в качестве нагелей металлических армирующих элементов (винтовая арматура, труба, металлические стержни) без цементной оболочки, что даже при

более плотной расстановке (меньший шаг в продольном и поперечном направлении) существенно сокращает время устройства и стоимость конструкции.

В соответствии с DIN1054–2005 расчётные значения сопротивлений различных типов грунта по боковой поверхности анкера/нагеля приведены в таблице 1.

Однако методика DIN1054–2005 предусматривает определение несущей способности только самозабуриваемого анкера/нагеля по формуле:

$$F_d = \sigma D l q_{sk}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр анкера/нагеля;  $l$  – длина анкера/нагеля;  $q_{sk}$  – сопротивление по боковой поверхности анкера/нагеля.

Из формулы (1) следует, что не учитывается влияние давления грунта на боковую поверхность анкера/нагеля, параметров глинистого и песчаного грунта (показатель текучести, коэффициент уплотнения).

Для изучения влияния этих факторов на несущую способность был разработан и изготовлен стенд для испытаний моделей нагелей и разработана методика испытаний.

С этой целью спроектирована и изготовлена новая установка, представляющая собой пространственную конструкцию, состоящую из металлической ёмкости с габаритами 900x600 мм на раме из швел-



леров, нагрузочного устройства из пневмо-домкратов и выдергивающего силового агрегата, через который передается усилие на нагель (рис. 7). Ёмкость может заполняться песчаным и/или глинистым грунтом различной консистенции.

Измерение перемещения анкера/нагеля регистрирует датчик перемещений; силы выдергивания — динамометр статических растягивающих усилий, отградуированных в килоньютонх; давления грунта на нагель — датчики давления.

При подборе эквивалентного материала для пластичных грунтов в качестве определяющих характеристик используется совокупность значений удельного сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\phi$ .

Для учёта конструктивных особенностей различных армирующих элементов планируется испытать показанные в таблице 2 конструктивные типы нагелей.

Программой испытаний предусмотрено проведение четырех полнофакторных экспериментов типа  $2^n$  при варьировании трех факторов: диаметра тела нагеля  $D$  (от 0,01 до 0,15 м), показателя текучести грунта  $I_L$  (от 0 до 0,5), давления грунта  $p$  (от 100 до 300 кПа).

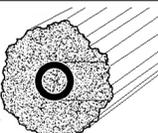
Чтобы учесть влияние трех факторов для четырех конструктивных типов нагелей необходимо провести  $(2^3) \cdot 4 = 8 \cdot 4 = 32$  опыта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос повышения надежности инфраструктуры железнодорожного и автомобильного транспорта и обеспечение безопасности

Таблица 2

Конструктивные типы нагелей

	гладкий арматурный стержень
	винтовая арматура
	металлическая труба
	винтовая арматура с цементной оболочкой

движения за счёт внедрения инновационных и ресурсосберегающих технических решений — грунтовых нагельных систем при строительстве и реконструкции объектов земляного полотна (в том числе расположенного на сейсмически активных территориях) является актуальным.

Анализ отраслевой нормативной литературы в области проектирования мероприятий по усилению и реконструкции объектов земляного полотна железных дорог показывает, что степень обеспеченности нормативной документацией по применению армогрунтовых конструкций недостаточна.

Не в полной мере в существующей документации отражены вопросы требований к проектированию, строительству и последующей эксплуатации армогрунтовых сооружений.

Основные научные разработки в области применения армогрунтовых конструкций при усилении и реконструкции земляного полотна были проведены в начале и конце 90-х годов, когда выбор армирующих материалов был однообразен.

Новизной подхода является разработка инструкции, регламентирующей порядок оптимального применения армогрунтовых конструкций для стабилизации и усиления земляного полотна железнодорожного пути.

Практическая значимость работ определяется тем, что внедрение грунтовых нагельных систем позволяет проводить усиление земляного полотна в сложных геологических условиях: земляное полотно и искусственные сооружения в районах размыва со стороны моря, на скально-обвальных участках, а также в условиях интенсивной городской застройки (урбанизированные территории).

Имеется положительный опыт применения нагельных систем на участках эксплуатации земляного полотна для усиления высоких насыпей, имеющих недостаточную устойчивость.

Для определения условий функционирования новых схем целесообразно применение физического центробежного моделирования. Поэтому требуются дополнительные исследования по оценке несущей способности нагельных конструкций при их использовании для укрепления земляного полотна.

Итогом таких исследований станет определение рациональной сферы приме-

нения инновационных ресурсосберегающих технических решений – грунтовых нагельных систем при строительстве и реконструкции объектов земляного полотна транспортной инфраструктуры (с использованием центробежного моделирования).

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методов расчёта анкерных и нагельных конструкций;
- исследовать особенности напряженно-деформированного состояния многорядных анкерных (нагельных) конструкций при различных условиях;
- исследовать закономерности распределения оползневой нагрузки между анкерами (нагельными) в зависимости от конфигурации многоярусного сооружения;
- выявить рациональные конструктивные решения многоярусных анкерных (нагельных) конструкций;
- разработать рекомендации по рациональному использованию анкерных (нагельных) конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по проектированию и технологии устройства анкерного крепления в транспортном строительстве. – М.: ЦНИИС, 1987. [Электронный ресурс]: <http://gostrf.com/normadata/1/4294851/4294851087.pdf>. Доступ 22.03.2016.

2. Ведомственные нормы и правила ВСН-506–88. Проектирование и устройство грунтовых анкеров.

3. СТО НОСТРОЙ 109–2013. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения. Требования к результатам работ. – М.: БСТ, 2013. – 215 с.

4. СТО-ГК «Трансстрой»-013–2007. Нагельное крепление котлованов и откосов в транспортном строительстве. Стандарт организации. – М.: Трансстрой, 2007. – 34 с.

5. Geotechnical engineering circular no. 7 Soil Nail Walls Publication FHWA-IF-03–017

6. Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В., Соковых М. Г. Особенности проектирования усиления земляного полотна анкерными и нагельными конструкциями // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Материалы XI межд. науч.-техн. конф., посвящ.

110-летию Г. М. Шахунянца. – М.: МИИТ, 2014. – С. 263–268.

7. Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В. Инновационные противооползневые конструкции с применением анкерных систем по укреплению земляного полотна при оползневых подвижках косогора на участке Петушки-Владимир Горьковской железной дороги // Инновационные конструкции и технологии в фундаментостроении и геотехнике: Материалы науч.-техн. конф. Липецк, 27–29 октября 2013 г. – М.: ИНЭП: Палеотип, 2013. – С. 37–41.

8. Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В. Геотехнические расчеты для обоснования усиления железнодорожной насыпи на участке Таёжный–Камарчага Красноярской железной дороги // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: Материалы междунауч.-техн. конф. – Ч. 1. – СПб., 2014. – С. 460–465.

9. Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В. Обоснование армогрунтового нагельного конструктивного решения по устройству земляного полотна под второй путь // Инженерные сооружения на транспорте: Сб. научных трудов / Под общ. ред. Ю. И. Романова. – Вып. 6. – М.: МИИТ, 2015. – С. 49–57.

10. Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В. Расчетное и макетное обоснование усиления земляного полотна армогрунтовыми поддерживающими сооружениями с применением нагельных конструкций // Политранспортные системы: Материалы VIII международной научно-техн. конференции, Новосибирск, 2015. – М.: СГУПС, 2015. – С. 226–232.

11. Виноградов В. В., Фроловский Ю. К., Зайцев А. А., Горлов А. В. Особенности применения методов расчётов устойчивости эксплуатируемого земляного полотна при проектировании мероприятий по его усилению в сложных природных условиях // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Материалы трудов XII междунауч.-техн. конф. – М.: МИИТ, 2014.

12. Выдрицкая М. П. Методика и планирование экспериментальных исследований анкерных систем // Строительство и техногенная безопасность: Сб. научных трудов. – Вып. 33–34. – Симферополь, 2010. – С. 65–76.

13. Востриков К. В., Скоркин В. Ф. К вопросу расчёта параметров нагельного крепления бортов котлованов // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: Материалы междунауч.-техн. конф. – Ч. 1. – СПб., 2014. – С. 427–434.

14. Geotechnical engineering circular no. 7 Soil Nail Walls Publication FHWA-IF-03–017

15. Еремин В. Я. Крепление бортов котлованов. Авторский строительный блог «Геотехнические проблемы России», 2014. [Электронный ресурс]: <http://blogostroy.ru/2011/10/06/крепление-бортов-котлованов/>. Доступ 22.03.2016.

Координаты автора: **Горлов А. В.** – [gorlov.alex.v@yandex.ru](mailto:gorlov.alex.v@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 09.12.2015, актуализирована 14.03.2016, принята к публикации 22.03.2016.

**Автор статьи является лауреатом конкурса «Молодые учёные транспортной отрасли», организованного Министерством транспорта Российской Федерации. В финале конкурса, состоявшемся 2 декабря 2015 года в рамках «Транспортной недели – 2015» в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ), работа заняла первое место в номинации «Развитие транспортной инфраструктуры, инновационные подходы в строительстве и эксплуатации искусственных сооружений».**



## AN INNOVATIVE APPROACH TO ROADBED RECONSTRUCTION

Gorlov, Aleksandr V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

### ABSTRACT

The article introduces the research in the field of reconstruction and strengthening of the roadbed of railways, the method of calculation and design of dowel-lath structures, reinforcing the surface sloping parts of the subgrade, created with the author's participation. The rational dowel sizes are

defined, innovative technical solutions for the roadbed for construction of the second tracks are offered, using mathematical and physical centrifugal modeling. The laboratory installation and technique of bench tests of reinforcing elements for different types of dowel structures are developed.

**Keywords:** railway, roadbed, dowel, innovative structure, modeling, design, bench testing, reconstruction, calculation methods, reinforcing elements.

### Background.

Improving the reliability of infrastructure of rail and road transport and traffic safety through the introduction of innovative and resource-saving technical solutions – ground dowel systems in construction and reconstruction of the roadbed facilities (including those located in seismically active areas) is a promising engineering solution.

Years of research and development – production works carried out in our country and abroad have shown the effectiveness of application of reinforced ground structures and dowel-lath structures to reinforce the roadbed. Nevertheless, the analysis shows that stress state of reinforced soil is understudied, and little attention was paid to research of deformability of reinforced structures with geomaterials.

The main indicator of reliability of construction objects is the impossibility of exceeding the limit states in them under the influence of the most unfavorable combination of calculated loads over the forecast useful life [1].

In the federal regulations to assess roadbed reliability it is offered to apply the safety factor, which depends on the line category.

Stability of slopes is determined by comparing the calculated values of safety factors (sustainability)  $K_s$  with permissible safety factor (sustainability)  $[K_s]$  in accordance with the requirements of SP 32–104–98. However, in the regulations degradation of properties of materials over time, environmental effects, etc. are not taken into account. There is a need to consider losses of reinforcement cross-section during operation.

For polymer reinforced elements the operating force cannot be determined by tensile fracture. It is motivated by deformations that occur after completion of construction, or loads in reinforced elements after relaxation of the material under the influence of permanent stress.

Taking into account that no material is constant, the assessment of possible changes of its characteristics in time and setting coefficients, taking into account these changes, remains acute.

To assess the operating force on the reinforced element within the design service life, it is necessary to give information on the deformation of creep.

Also the problem of estimating the vibrodinamic impact of train on the reinforced ground construction is still relevant.

**Objective.** The objective of the author is to present an innovative approach to roadbed reconstruction.

**Methods.** The author uses mathematical modeling (engineering calculations), layout and geotechnical centrifugal physical modeling.

### Results.

#### The methodology of calculation of dowel structures

When designing strengthening of the roadbed it is necessary to distinguish the features of calculation of ground anchorages from dowels. A distinctive feature of dowels from similar retaining structures is a joint work of ground and the fastening element, in which there is no transmission of pulling load from the fastened sliding wedge and the binding of the soil mass along the entire length takes place [1].

Two main types can be distinguished among dowel ground systems:

1. reinforcing back slope / back fall;
2. fixation of back slope / back fall by dowels with lattice siding.

The analysis of national literature on the production of ground dowels showed that the process of selection of such parameters of dowel fastening as a step in vertical and horizontal directions, diameter, angle of slope and length of dowels must be carried out by calculating on two groups of limit states (load-bearing capacity and deformability). At the same time there is no method of calculating these parameters, and only recommended ranges of their values are given that need to be clarified, depending on ground conditions and the geometry of strengthened structures, the development of suitable values of these parameters is also appropriate. To determine the operating conditions the use of centrifugal physical modeling is advisable.

The guidance documents [1–3] present only a calculation method for the first group of limiting states, based on the conditions of stability of reinforced ground wall against the shear along the bottom and tilting over relative to the intersection point of the slope surface with the base.

According to [3, 4] dowel fastening is a geotechnical structure, designed to ensure the stability of slopes, embankment slopes and depressions, vertical and inclined walls of pits by installing in the ground array a system of reinforced elements (steel rods, tubes, composite elements, etc.). Dowels connect the ground array along its entire length, forming a self-supporting gravity retaining wall of reinforced soil.

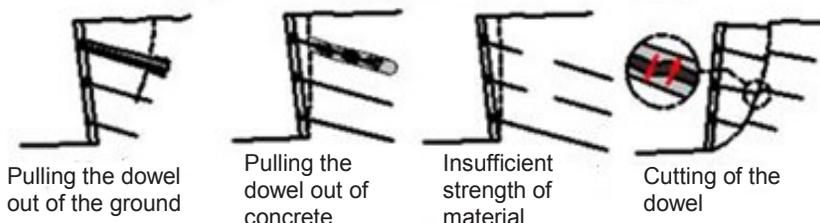
Dowel fastening does not require the construction of a massive building envelope (piled, sheet pile, concrete and other retaining walls), it is used when natural slopes are impossible or impractical under the terms of an existing building system.

There are no schemes of possible failures of dowel fastening structures that must be considered in the calculations. Since the fastening is a reinforced ground system, the main reasons for its failure are

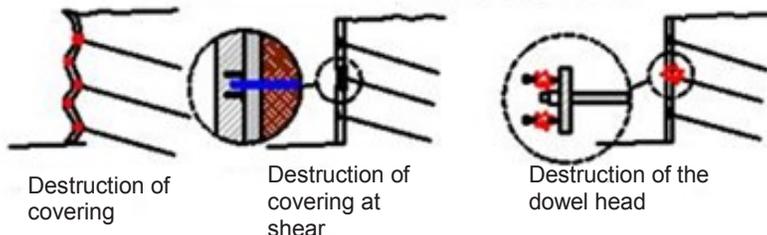
### a) External stability



### b) internal stability



### c) local stability



**Pic. 1. The main reasons for the destruction of ground dowel system.**

similar to those observed with reinforced ground retaining walls (Pic. 1).

And accordingly, the calculation method shall include the following steps:

- definition of the array of reinforcement parameters (number of storeys, installation step, length, slope, diameter of dowels) from the condition of ensuring joint work of dowel elements and ground (internal stability);

- checking the length of dowels from the condition of reinforced array stability for rollover and shift on the base (external stability);

- definition of characteristics of protective coating of walls (slope) and checking the step of placement of dowels from the condition of prevention of local overbreak between dowels.

We have developed a new model and calculation scheme of internal stability of a dowel fastening.

Evaluation of internal stability is tested on the basis of two types of sliding surfaces – **flat and broken**.

Calculation estimates the relation of forces of resistance and shear acting on the sliding surface. In addition, reliability coefficients are used, which are not taken into account in the Russian standards, but are present in the foreign techniques.

For each dowel three parameters are estimated:

- Tearing resistance;
- Resistance to pulling from the ground;
- Bearing capacity of the dowel head.

Thus, for each sliding surface a critical parameter for a dowel is determined (strength, resistance to pulling from the ground, bearing capacity of the head)

(Pic. 2) is determined for each sliding surface. Bearing capacity is calculated taking into account the location of its line of intersection with the sliding surface. The dowel, which is in front of the sliding surface, is not taken into account in the calculation. If the sliding surface intersects the dowel, bearing capacity is determined by the formula

$$F = \min(R_b \cdot x, R_p \cdot R_{or} + R_a \cdot y), \quad (1)$$

where  $x$  is length of the dowel behind the sliding surface in the direction of the ground array;

$y$  is length of the dowel opposite the sliding surface;

$R_h$  is permissible load on the head;

$R_s$  is dowel strength;

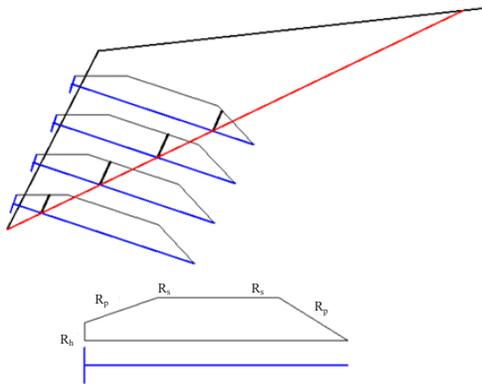
$R_p$  is resistance to pulling out.

Abroad broad experience in anchor and dowel structures to stabilize and strengthen the roadbed has been accumulated [5].

In domestic practice there is the experience in effective use of such structures to stabilize the roadbed of railways.

In July and August 2013 within the boundaries of the station Vladimir of Gorky Railway the reconstruction of the roadbed was carried out after slumping of excavation slopes, which occurred in July 2013 after a long rain [6]. The solution was discharge of water in the slope of the depression using lateral drainage slots and strengthening of slopes with anchor structures that represent two layers of reinforced concrete plates placed along the slope, with the anchors with the length of 25 m (Pic. 3) [7]. Pre-tension in anchors was not made.





**Pic. 2. Distribution of tensile strength along the dowel.**

In another case, specialists of MIIT carried out geotechnical calculations to assess the deformable roadbed state on the section Tazhnyy – Kamarchaga of Krasnoyarsk railway and to study the possibility of its strengthening with dowel structures [8]. On the basis of materials of engineering research and project documentation calculation analysis was made to identify the causes and conditions of deformation of the double-track long exploited subgrade with the height of up to 20 m.

#### **Strengthening of subgrades with dowel-lath structures**

Long exploited subgrades, as a rule, have developed throughout the ballast tails, which were formed over time when performing repairs and routine maintenance of track, often with a high steepness of slopes, which can lead to slipouts and deformation under the influence of natural and anthropogenic factors.

Deformability of subgrades with ballast tails is largely determined by humidity conditions.

Deformation of sloping parts of subgrades, slopes and depressions may be associated with a lack of general and local stability.

The traditional way of stabilization and strengthening of such subgrades are cropping of tails, grade flattening and dumping of counter dams from draining soils. Despite reliability of these activities, they have significant drawbacks: require large amounts of scarce draining soils, allocation of a large area for the base of counter dams, extension of culverts, transfer of communication lines, duration of «windows».

On the basis of the research at MIIT at the department of Track and track facilities ways of strengthening of the roadbed of railways with reinforced ground structures have been previously created and technical guidance, recommendations,



**Pic. 3. General view of the object.**

technical solutions group albums, including related to anchor structures have been offered.

The alternative may be dowel-lath fastening of slopes of subgrades excavations, over-tube zone.

Dowel-lath structure is a system of protective coating or the slope by its fixing with a high-tensile metallic steel lath through support gear plate using dowels mounted with predetermined step vertically and horizontally.

The required reinforcement density is determined by calculations using finite element method.

With regard to local stability, particularly in areas with a predetermined sliding surface (subgrade with ballast tails, surface layers of depressions), experts of MIIT developed a method of designing and calculation of strengthening of the roadbed with anchor and dowel structures (Pic. 4), which provides the impact of adverse factors – including earthquakes, infiltration of precipitation and groundwater.

In contrast to the existing methods of calculation of dowel shore are taken into account:

- Step of dowel placement in longitudinal and transverse directions;
- Different trajectories (mechanism) of possible displacement of the surface layers of the subgrade (ballast tails);
- The presence of the covering (lath);
- The impact of external factors on the behavior of the structure.

When considering the unstable areas of slopes two schemes of possible shift are taken into account:

- The trajectory of the displacement of a single plot of ground array;
- Wedge-shaped trajectory of displacement of certain unstable areas of ground array.

In assessing the balance of the selected section, taking into account the conditions of strength of Mohr-Coulomb theory the value of the holding force of dowel  $S$  with accompanying pre-tensioning force  $V$  can be represented by the calculated formula, the criterion for which is the excess of the total value of holding force over the shear, taking into account safety factors:

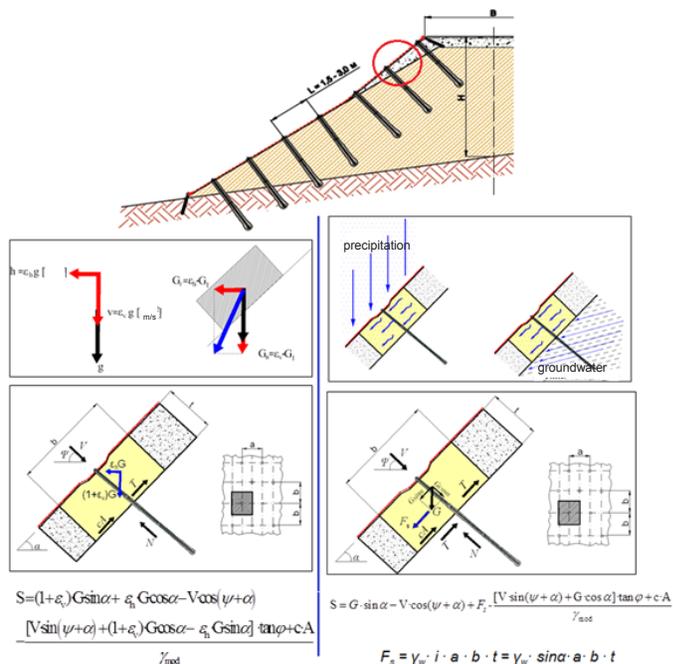
#### **Reconstruction of the roadbed for the second tracks**

In this connection, it is advisable to consider the possibility of using dowel structures not only as the primary means of strengthening, but also as an auxiliary structure in arrangement of reinforced ground walls of truncated dimensions.

An innovative technical solution is offered for strengthening of the operated roadbed of railways during its reconstruction for the second tracks by broadening of the main site, grade flattening, arrangement of reinforced ground wall with minimal development of its base and using dowel structures that reinforce the existing sloping part of the roadbed and are connected via the reinforced elements of support structures.

This solves the problem of strengthening of unstable sloping parts, increases the stability of the roadbed as a whole, reduces the amount of soil and the amount of reinforcing material in a retaining wall. In the context of the specified task, a variant is offered that allows for efficiency and increase in effectiveness of reconstruction of the roadbed in constrained conditions [9].

Based on the analysis of engineering studies and field surveys of objects, as well as the regulatory framework assessment of the subgrade was completed, the conditions and the reasons for its deformation were



**Pic. 4. Calculation scheme to reinforce the roadbed of railways with anchor and dowel structures.**

defined, a calculation scheme for a typical profile of a long exploited subgrade was developed. Design parameters were chosen in view of the use of modern reinforcing materials.

Used methods of research: mathematical modeling (engineering calculations), layout and geotechnical centrifugal physical modeling.

Subgrade was represented by exploited subgrade with advanced ballast tails. To establish quantitative indices of characteristic transverse profile the materials of analysis of geological engineering surveys on 183 cross profiles of 73 exploited subgrades were studied. The surveyed subgrades with height from 1 to 20 m were aged from 30 to 100 years old, built of local soils–clay loams and placed on a solid foundation. As an example the characteristic subgrade of clay soils 12 m in height was selected.

For the sake of saving space and materials we have developed a design, which is a reinforced ground retaining wall, mounted in the slope using dowels (anchors), embedded in the subgrade body. Dowels perform two functions in the design:

- Improving the stability of the subgrade slope;
- Holding reinforced ground retaining wall from rollover.

Since reinforced ground retaining wall is located directly at the base of the subgrade and in the bottom the length of reinforcing elements is limited by the slope, additional holding force is required for fixing a retaining wall against the shear and rollover. This additional force is created by dowels.

Calculation have tested the stability of the subgrade in construction period after strengthening of the slope with dowels. Parameters of dowels were chosen taking into account dependencies of calculated coefficients of the subgrade stability  $K$  and forces  $N$ , arising in dowels from the angle of their inclination to the horizon. Based on analysis of the graphs (Pic. 5) the angle of inclination of dowels equal to 35 degrees was adopted. Because at this angle the greatest efforts in dowels arise, the highest stability factor is achieved and the most efficient operation of the structure is provided.

Thus, the structure of strengthening of the subgrade for the second track (Pic. 6) was offered, which is recommended for use in constrained conditions in construction and reconstruction of the roadbed of railways; while strengthening the sloping parts of the roadbed without cutting, as well as the strengthening of landslide slopes. The design is processable and can be built on the field side of the railway.

According to the results of calculations and design of the subgrade, enhanced with reinforced ground wall and dowel structures, its layout was made, which was presented in the section «Ecology and rational use of land» in the exhibition of scientific and technical creativity of youth at VDNH in Moscow in 2014 and was awarded a medal [10].

In the future performance of the construction is supposed to be checked using the method of centrifugal modeling on the geotechnical centrifuge of MIIT.

#### Development of the installation and techniques of bench tests

To assess the interaction parameters for different designs of dowels and ground conditions pulling-out tests are conducted, taking into account various stress.

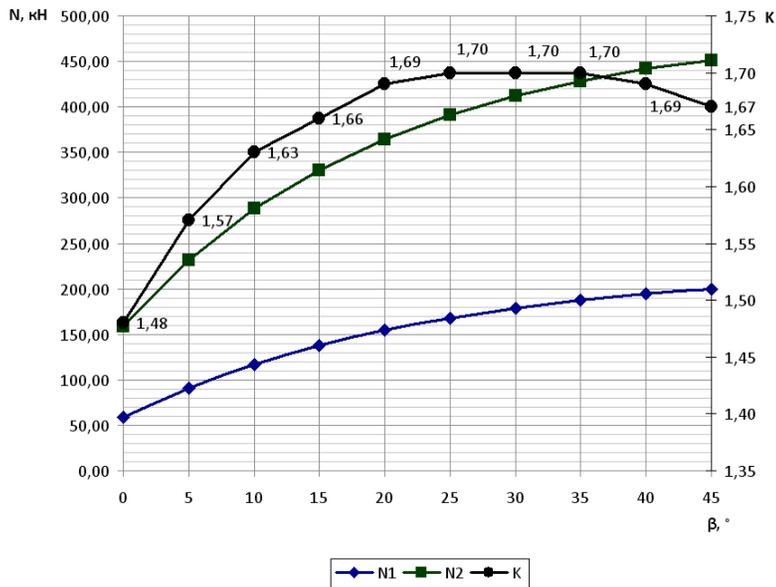
Tests for pulling-out simulate actual working conditions of the dowel in the ground.

The purpose of the tests carried out on the stand, is to study on physical models dependencies of resistance to pulling-out of a dowel fastening on the main parameters: type and soil flow index, the diameter of the dowel and its compression by the surrounding soil.

To understand the mechanism of interaction on the surface the reinforcing element-soil tests it is planned to conduct pulling-out tests. They must simulate real working conditions of the dowel in the ground.

Analysis of existing methods for calculating of the bearing capacity of dowels on the ground showed that they estimate only dowels with cement body around the metal element. However, in some cases it is expedient





**Pic. 5. Graph of dependence of stability coefficient K on the angle of inclination of dowels and forces in dowels N on the angle of inclination of dowels  $\beta^\circ$ .**

to use as dowels metallic reinforcing elements (screw fittings, pipe, metal rods) without cement shell that even with denser arrangement (smaller step in longitudinal and transverse directions) substantially reduces the time for installation and cost of the structure.

In accordance with DIN1054–2005 calculated values of resistance of different soil types on the lateral surface of the anchor / dowel are shown in Table 1.

However, the method of DIN1054–2005 provides for definition of the bearing capacity of only self-drilling anchor / dowel according to the formula:

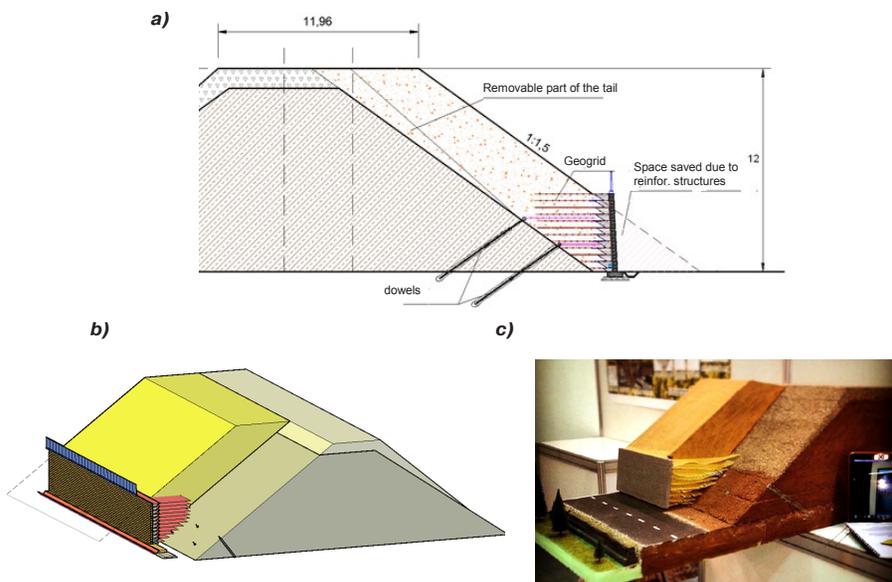
$$F_d = \pi D l q_{sk} \quad (1)$$

where  $D$  is diameter of anchor/dowel;  $l$  is length of anchor/dowel;  $q_{sk}$  is resistance on the lateral surface of anchor/dowel.

From the formula (1) it follows that it does not take into account the pressure of soil on the lateral surface of the anchor / dowel, parameters of clay and sandy soil (liquidity index, compression ratio).

To study the impact of these factors on the bearing capacity bench for dowel models test has been developed and manufactured, as well as testing procedures.

To that end, a new installation was designed and built, which is a three-dimensional structure consisting of a metal container with dimensions 900x600 mm on the frame of the channels, the load device from exhaust jacks and pulling out power unit, through which force on the dowel is transmitted (Pic. 7). Container can be filled with sand and / or clay soils of varying consistency.



**Pic. 6. The design in three dimensions: a) cross-section of the subgrade; b) mathematical volumetric model; c) a general view of the layout.**

Measuring movement of the anchor / dowel is recorded by displacement sensor; pulling out force – by dynamometer of static tensile forces, calibrated in kilonewtons; ground pressure on the dowel – by pressure sensors.

When selecting an equivalent material for plastic soils as defining characteristics, a set of values of specific adhesion  $c$  and internal friction angle  $\varphi$  is used.

To account for the structural characteristics of various reinforcing elements it is planned to test design types of dowels shown in Table 2.

Test program provides for holding four full factorial experiments of the type  $2^n$  while varying three factors: dowel body diameter  $D$  (from 0,01 to 0,15 m), liquidity index of soil  $I_L$  (from 0 to 0,5), ground pressure  $p$  (from 100 to 300 kPa).

To account for the influence of three factors for four structural types of dowels it is necessary to conduct  $(2^3) \cdot 4 = 8 \cdot 4 = 32$  experiments.

#### Conclusion.

1) The issue of increasing the reliability of infrastructure of rail and road transport and traffic safety through the introduction of innovative and resource-saving technical solutions – dowel ground systems in construction and reconstruction of the roadbed (including those located on the seismically active areas) remains acute.

Analysis of the regulatory professional literature in the design of measures for strengthening and reconstruction of the roadbed of railways shows that the degree of supply with regulatory documentation for use of reinforced ground structures is insufficient.

In the existing documentation issues of requirements for design, construction and subsequent operation of reinforced ground facilities are reflected not fully.

Basic scientific development in the field of application of reinforced ground structures during strengthening and reconstruction of the roadbed were conducted at the beginning and end of the 90s, when the choice of reinforcing materials was uniform.

Novelty of these works is the development of instructions regulating the procedure for optimal use of reinforced ground structures to stabilize and strengthen the roadbed of railway track.

The practical significance of the works is determined by the fact that the introduction of dowel ground systems allows strengthening of the roadbed under complex geological conditions: roadbed and artificial structures in the areas of erosion from the sea, on the rocky, in landslide areas, as well as in

Table 1

### Resistance on the lateral surface of anchor / dowel, depending on the type of soil

Type of soil	Resistance on lateral surface $q_{sk}$ , kPa
Medium and coarse gravel	200
Sand, gravel sand	150
Clay sand, loam, clay	100

conditions of intense urban development (urban areas).

There is a positive experience of application in the areas of operation of the roadbed to reinforce high subgrades with a lack of stability.

To determine the operating conditions it is advisable to use physical centrifugal modeling. Therefore, more research is needed to assess the bearing capacity of dowel structures during their use to strengthen the roadbed.

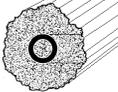
The outcome of these studies is to define the scope of rational application field of innovative technical solutions – dowel ground systems in construction and reconstruction of the roadbed facilities of transport infrastructure (using a centrifugal modeling).

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- perform analysis of existing methods of calculation of anchor and dowel structures;

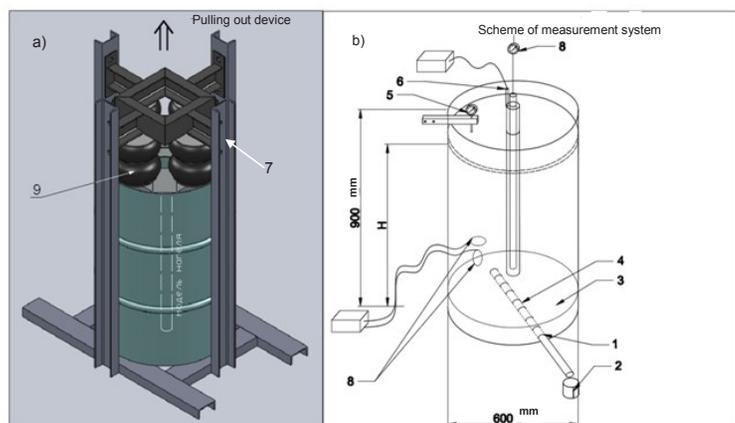
Table 2

### Structural types of dowels

	plain bar
	screwed fittings
	metal pipe
	screwed fittings with cement lining

**Pic. 7. Scheme of installation and measurement system:**  
a) general view; b) measuring system.

- 1 – fluid outlet opening;
- 2 – measuring container;
- 3 – drainage;
- 4 – perforated pipe;
- 5, 6 – displacement sensor;
- 7 – frame;
- 8 – pressure sensor;
- 9 – pneumatic jacks.



- explore the features of the stress-strain state (SSS) of multi-row anchor (dowel) structures under various conditions;
- investigate the landslide pressure distribution patterns between anchors (dowels), depending on configuration of multi-storey buildings;
- identify the rational design solutions of multilevel anchor (dowel) structures;
- develop recommendations for the rational use of anchor (dowel) structures.

## REFERENCES

1. Guidelines for design and arrangement method of the anchor fastening in transport construction [Rukovodstvo po proektirovaniju i tehnologii ustrojstva ankernogo krepjenja v transportnom stroitel'stve]. Moscow, CNIIS publ., 1987. [Electronic source]: <http://gostrf.com/normadata/1/4294851/4294851087.pdf>. Last accessed 22.03.2016.
2. Departmental regulations BCH-506–88. Design and installation of ground anchors [Vedomstvennye normy i pravila VSN-506–88. Proektirovanie i ustrojstvo gruntovykh ankerov].
3. STO NOSTROY109–2013. Arrangement of ground anchors, dowels and micropiles. Regulation and control of implementation. Requirements for the results of work [STO NOSTROY 109–2013. Ustrojstvo gruntovykh ankerov, nagelej i mikrosvaj. Pravila i kontrol' vypolnenija. Trebovanija k rezul'tatam rabot]. Moscow, BST publ., 2013, 215 p.
4. STO-SC «Transstroj»-013–2007. Dowel fastening of pits and slopes in transport construction. Organization standard [STO-GK «Transstroj»-013–2007. Nagel'noe krepjenie kotlovanov i otkosov v transportnom stroitel'stve. Standart organizacii]. Moscow, Transstroj publ., 2007, 34 p.
5. Geotechnical engineering circular no. 7 Soil Nail Walls Publication FHWA-IF-03–017
6. Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V., Sokovykh, M. G. Design features of strengthening of the roadbed with anchor and dowel structures [Osobennosti proektirovanija usilenija zemljanogo polona ankernymi i nagel'nymi konstrukcijami]. Modern problems of design, construction and operation of railway track: Proceedings of XI international scientific-technical conference dedicated to the 110<sup>th</sup> anniversary of G. M. Shakhunyan. Moscow, MIIT publ., 2014, pp. 263–268.
7. Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V. Innovative landslide protection structures with the use of anchor systems to strengthen the roadbed in case of landslide motions at hillside at the site Petushki–Vladimir of Gorky Railway [Innovacionnye protivopozlnevnye konstrukcii s primeneniem ankernykh sistem po ukrepleniju zemljanogo polona pri opolznevnykh podvizhkah kosogora na uchastke Petushki-Vladimir Gor'kovskoj zheleznoj dorogi]. Innovative structures and technology of foundation engineering and geotechnology: Proceedings of scientific-technical conference. Lipetsk, 27–29 October 2013, Moscow, INEP: Paleotype publ., 2013, pp. 37–41.
8. Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V. Geotechnical calculations to justify the strengthening of the railway subgrade at the site Tazhnyj–Kamarchaga of Krasnoyarsk Railway [Geotekhnicheskie raschety dlja obosnovanija usilenija zheleznodorozhnoj nasypki na uchastke Tajozhnyj–Kamarchaga Krasnojarskoj zheleznoj dorogi]. Modern geotechnology in construction and their scientific and technical support: Proceedings of international scientific-technical conference. Part 1. St. Petersburg, 2014, pp. 460–465.
9. Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V. Substantiation of reinforced ground constructive solution for arrangement of the subgrade for the second track [Obosnovanie armogruntovo-nagel'nogo konstruktivnogo reshenija po ustrojstvu zemljanogo polona pod vtoroj pui']. Engineering structures in transport; Collection of scientific papers. Ed. by Yu. I. Romanov. Iss. 6. Moscow, MIIT publ., 2015, pp. 49–57.
10. Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V. Calculated and breadboard substantiation of subgrade strengthening by reinforced ground supporting structures using dowel structures [Raschetnoe i maketnoe obosnovanie usilenija zemljanogo polona armogruntovymi podderzhivajushhimi sooruzhenijami s primeneniem nagel'nykh konstrukcij]. Polytransport system: Proceedings of VIII International scientific-technical conference. Novosibirsk, 2015, Moscow: STU publ., 2015, pp. 226–232.
11. Vinogradov, V. V., Frolovskiy, Yu. K., Zaitsev, A. A., Gorlov, A. V. Application features of methods of calculation of stability of exploited subgrade exploited in the design of measures to strengthen it under difficult natural conditions [Osobennosti primenenija metodov raschjotov ustojchivosti ekspluatiruemogo zemljanogo polona pri proektirovanii meroprijatij po ego usileniju v slozhnykh prirodnykh uslovijah]. Modern problems of design, construction and operation of railway track: Proceedings of XII of international scientific-technical conference. Moscow, MIIT publ., 2014.
12. Vydritskaya, M. P. Technique and planning of experimental research of anchor systems [Metodika i planirovanie eksperimental'nykh issledovanij ankernykh sistem]. Construction and technogenic safety: Collection of scientific papers. Iss. 33–34. Simferopol, 2010, pp. 65–76.
13. Vostrikov, K. V., Skorkin, V. F. On the issue of calculation of parameters of dowel fastening of pits' boards [K voprosu raschjota parametrov nagel'nogo krepjenija bortov kotlovanov]. Modern geotechnology in construction and their scientific and technical support: Proceedings of international scientific-technical conference. Part 1. St. Petersburg, 2014, pp. 427–434.
14. Geotechnical engineering circular no. 7 Soil Nail Walls Publication FHWA-IF-03–017
15. Eremin, V. Ya. Fixing of pits' boards. Author's blog on construction «Geotechnical problems of Russia», 2014 [Krepjenie bortov kotlovanov. Avtorskij stroitel'nyj blog «Geotekhnicheskie problemy Rossii», 2014]. [Electronic source]: <http://blogostroy.ru/2011/10/06/krepjenie-bortov-kotlovanov/>. Last accessed 22.03.2016.

Information about the author:

**Gorlov, Aleksandr V.** – Ph.D. student at the department of Track and track facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia. [gorlov.alex.v@yandex.ru](mailto:gorlov.alex.v@yandex.ru).

Article received 09.12.2015, revised 14.03.2016, accepted 22.03.2016.

**The author is a prize winner of the contest «Young transport scientists and researchers» organized by the Ministry of Transport of the Russian Federation within the framework of «Transport Week – 2015». The work was presented during the final round of the contest held on December 2, 2015 in Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) and got the first place in nomination «Development of transport infrastructure, innovative approaches to construction and operation of artificial structures».**