

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS423 (<https://doi.org/10.15862/07SATS423>)

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

Функциональные возможности методики расчета железнодорожной подходной насыпи к искусственным сооружениям с учетом температурного воздействия и взаимодействия усиливающих свай с грунтом

Церех С.Г.

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Церех Станислав Геннадьевич, e-mail: tserekh@list.ru

Аннотация. Для бесперебойной работы инфраструктуры железнодорожного сообщения необходимо обеспечить надлежащее функционирование насыпи земляного полотна и искусственных сооружений (водопропускные трубы, мосты и путепроводы), что соответствует долгосрочной программе развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги», утвержденной Правительством Российской Федерации от 19 марта 2019 г. N 466-Р. В зонах сопряжения неоднородных сооружений, а именно насыпи земляного полотна и искусственных сооружений возникают деформации (просадки) грунта, что приводит к изменению динамического воздействия на искусственные сооружения (водопропускные трубы, мосты и путепроводы) и, как следствие, к их ускоренному повреждению.

Актуальность темы определяется целевыми программами по оптимизации инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечение бесперебойного функционирования, надежности конструкций искусственных сооружений и земляного полотна. При проектировании искусственных сооружений используется целый ряд решений обеспечивающий надежное функционирование системы земляное полотно — искусственное сооружение (водопропускная труба, опора моста,

тоннель, прокладка коммуникаций). Проблема состоит в том, что их применение является малоэффективным без научного и нормативного обеспечения и ограничено отсутствием эффективных решений по обеспечению жесткости конструкции земляного полотна на подходах к искусственному сооружению. В связи с чем, разработка новых конструктивно-технических решений по сопряжению системы земляное полотно — искусственное сооружение является актуальной задачей.

В статье железнодорожные перевозки рассматривается как производственный процесс, бесперебойное функционирование которого обеспечивается плавным сопряжением подходов насыпей с искусственными сооружениями (мостами, водопропускными трубами, подземными коммуникациями). В зоне сопряжения возникают просадки, повреждения целостности земляного полотна, деформации, приводящие к появлению дополнительных динамических сил и возникновению неровностей и даже разрушению дорожной одежды (на автомобильных дорогах), а также повреждению самих искусственных сооружений.

Ключевые слова: жесткость; соединение; мостовые; водопропускные; грунт; участок сопряжения; нагрузка

Functional capabilities of the calculation methodology of railway approach embankment to engineering structures taking into account temperature effect and interaction of reinforcing piles with soil

Stanislav G. Tserekh

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Corresponding author: Stanislav G. Tserekh, e-mail: tserekh@list.ru

Abstract. For the smooth operation of the railway infrastructure, it is necessary to ensure the proper functioning of the roadbed embankment and engineering structures (pipe-culverts, bridges and overpasses), which corresponds to the long-term development programme of the open joint-stock company «Russian Railways» approved by the Government of the Russian Federation dated 19 March 2019 N 466-R. In the interface zones of nonhomogenous structures, namely roadbed embankments and engineering structures, ground distortion (soil settlement) occur, which leads to a change in the dynamic impact on engineering structures (pipe-culverts, bridges and overpasses) and, as a consequence, to their accelerated damage.

The timeliness of the topic is determined by the target programmes for railway transport infrastructure optimisation, ensuring uninterrupted operation, reliability of engineering structures and roadbed. When designing engineering structures, a number of solutions are used to ensure reliable functioning of the roadbed — engineering structure system (pipe-culvert, bridge substructure,

tunnel, laying of communications). The problem is that their application is ineffective without scientific and regulatory support and is limited by the lack of effective solutions to ensure the rigidity of the roadbed structure on the approaches to the engineering structure. In this connection, new constructive and technical solutions development for the interface of the roadbed — engineering structure system is an urgent task.

The article considers railway transportations as a production process, the smooth functioning of which is ensured by smooth conjugation of approach embankments with engineering structures (bridges, pipe-culverts, underground communications). In the interface zone there are soil settlements, damage to the roadbed integrity, deformations leading to the appearance of additional dynamic forces and the emergence of irregularities and even destruction of the road pavement (on motorways), as well as damage to the engineering structures themselves.

Keywords: rigidity; compound; pavements; culvert; priming; interface area; load

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Анализ состояния проблемы

The problem state analysis

Проблема обеспечения плавного сопряжения представляет значительный интерес и потому ее анализу посвящены работы многих ученых и инженеров.

В начале отметим работу Журавлева М.М. [1], в которой изложены вопросы устройства сопряжений автодорожных мостов и путепроводов с насыпью. Показаны причины деформаций земляного полотна около мостов и необходимость комплексного подхода при выборе конструктивных решений. В работе [2] рассмотрена задача стабилизации деформаций высоких насыпей над водопропускными трубами, приводится опыт инженерно-геологического и геофизического обследования деформированных высоких насыпей над водопропускными трубами в Западной Сибири, описываются способы восстановления их эксплуатационной надежности. Замуховский А.В. в статье [3] рассмотрел подходы к обоснованию для различных эксплуатационных условий нормативов упругих осадок подрельсового и подшпального оснований, получаемых в ходе нагрузочных испытаний. Особое внимание уделено критериям качества при обеспечении стабильности рельсовой колеи, уровням надежности железнодорожного пути и оптимизации расходов на его содержание. Замуховский А.В. и Меренченко К.В. в [14] описали результаты экспериментов, проведенных кафедрой «Путь и путевое хозяйство» МИИТ в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения. Было проведено моделирование прохода высокоскоростного поезда по участкам сопряжения, изучены свойственные им динамические особенности и влияние на них условий эксплуатации. Предложены меры совершенствования переходной зоны путем снижения жесткости пути на устоях моста и повышения жесткости на подходах к мостам и другим инженерным сооружениям с целью снижения нагрузки на путь.

Ланис А.Л. с учениками и сотрудниками [4; 5] рассмотрели вопросы сопряжения мостов, путепроводов и виадуков с подходными насыпями, обозначив причины образования остаточных деформаций в дорожном полотне. Ими предложена конструкция сопряжения перечисленных искусственных сооружений с подходными насыпями, заключающаяся в армировании рабочего слоя земляного полотна на переходном участке бетонными буронабивными сваями (БНС) в раскатанных скважинах. Расчетами упругих прогибов дорожного полотна и исследованием их изменения вдоль участка сопряжения подтверждена эффективность применения предложенного способа сопряжения. Также ими предложен способ усиления земляного полотна инъектированием. В статье рассмотрены способы усиления земляного полотна с использованием

инъектирования твердеющими растворами. Предложены технологии, позволяющие выполнять работы по усилению эксплуатируемого земляного полотна без ограничения движения. Представлены оптимальные инженерные условия для применения рассмотренных способов. Приведены значения физико-механических характеристик до и после усиления, полученные по результатам контроля качества выполненных работ на реальном объекте. Статья подготовлена в рамках гранта ОАО «Российские железные дороги» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта. Армирование грунтов земляного полотна с использованием инъектирования твердеющими растворами вне габарита движения поездов позволяют существенно повысить экономическую эффективность и технологичность в вопросах усиления земляного полотна. В статье предложены оптимальные способы усиления земляного полотна в зависимости стадии развития дефектов и деформаций. Усовым Д.А. [7] (научный руководитель — Ланис А.Л.), отмечено следующее: на основе обработки статистических данных установлена функциональная зависимость длины участка накопления деформаций на подходах к мостовым сооружениям от изменения деформационных характеристик земляного полотна и скорости движения подвижного состава; сформулирован комплексный подход к проектированию железнодорожного пути на подходах к мостовым сооружениям, позволяющий подобрать конструкции переменной жесткости в зависимости от зоны деформирования; установлены функциональные зависимости изменения жесткости пути от параметров конструкций переменной жесткости и грунтовых условий; впервые обоснованы и установлены критерии предельной разности жесткости земляного полотна и устоя искусственного сооружения, позволяющие выбрать конструкцию переменной жесткости в рамках комплексного подхода к проектированию.

В статье [7] приведены результаты обобщения опыта интерпретации данных обследования нового и длительно эксплуатируемого железнодорожного земляного полотна и других объектов железнодорожной инфраструктуры, полученных сейсмотомографическим методом и методом георадарного профилирования и зондирования. Разбираются проблемы и недостатки объективной и качественной оценки топографической съемки, состояния грунтов основания сооружений на основе инженерно геодезических и инженерно геологических изысканий, подкрепленных георадиолокационной съемкой, необходимых для разработки конструктивных и объемно-планировочных решений в промышленно-гражданском строительстве.

Работа Д.М. Шапиро [9] посвящена изложению и обоснованию положений механики грунтов, которые приняты в нормативно-методических документах и программном обеспечении расчётов грунтовых оснований,

природных и искусственно возводимых геотехнических объектов. Излагаются научные представления о несущей способности и деформировании грунтов как физических тел, описываемых уравнениями теорий упругости и пластичности.

Книга состоит из четырёх глав. В первой главе рассматриваются определяющие уравнения механики грунтов. Во второй главе содержится изложение нормативно-теоретических основ проектирования оснований, геотехнических объектов и описание расчётных моделей грунтовых сред как линейно деформируемых и жёсткопластических тел. В третьей главе приводятся решения классических прикладных задач, основанных на использовании указанных выше теорий. В четвёртой главе содержится характеристика физически нелинейных моделей, постановка и описание решения смешанной (упругопластической) задачи теории упругости и пластичности для грунтов на основе метода конечных элементов; приводятся примеры решения научно-технических задач.

Книга посвящена изложению и обоснованию теории, уравнений и математических процедур метода конечных элементов (МКЭ) как средства решения задач строительной механики и теории упругости. Изложена алгоритмизация и дано описание решений физически нелинейных задач для стальных и железобетонных конструкций, грунтовых оснований и объектов геотехники.

Е.С. Ашпиз в статье [10] отмечает, что стратегическими задачами развития ОАО «Российские железные дороги» на современном этапе является организация на сети дорог в грузовом движении ведения тяжёловесных поездов, а в пассажирском — высокоскоростных поездов. Решение этих задач требует усиления существующего земляного полотна, построенного по техническим нормам предыдущих лет, и которое, в отличие от верхнего строения железнодорожного пути, в течение срока его эксплуатации не заменялось и не обновлялось. К настоящему времени в земляном полотне под влиянием многочисленных внешних переменных во времени природных и техногенных факторов с момента его сооружения произошли изменения, которые привели к возникновению различных деформаций и дефектов, протяжение которых составляет около 7 % от длины сети железных дорог.

А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов в статье [5] рассмотрели вопросы сопряжения мостов, путепроводов и виадуков с подходными насыпями. Обозначены причины образования остаточных деформаций в дорожном полотне. Предложена конструкция сопряжения перечисленных искусственных сооружений с подходными насыпями, заключающаяся в армировании рабочего слоя земляного полотна на переходном участке бетонными буронабивными сваями (БНС) в раскатанных скважинах.

Расчетами упругих прогибов дорожного полотна и исследованием их изменения вдоль участка подтверждена эффективность применения предложенного способа сопряжения. В статье рассмотрены основные проблемы, с которыми могут столкнуться предприятия путевого хозяйства при организации движения поездов с повышенными скоростями и с нагрузками на ось свыше 25 тс. Определены основные факторы, влияющие на стабильность земляного полотна железных дорог, опирающихся на слабые основания в условиях повышенного вибродинамического воздействия, вызванного повышением скоростей движения поездов и осевых нагрузок. Использован сравнительный анализ состояния железнодорожного пути, земляное полотно которого опирается на прочное и слабое основание, основанный на статистических данных. Показано, что важнейшим показателем, определяющим надежность конструкции железнодорожного пути в целом, является несущая способность слабого основания, которая должна определяться с учетом действия вибродинамических нагрузок и снижения под ее влиянием прочностных свойств грунтов основания земляного полотна. Анализ проблем позволил сделать вывод о необходимости разработки паспортов несущей способности земляного полотна и его основания. Рассмотрено армирование основной площадки высокой насыпи инъектированием твердеющих растворов. Для обеспечения достоверности результатов моделирования разработаны модели усиленных массивов, максимально полно отражающие внутренние процессы их работы. При численном моделировании выполнялось исследование работы моделей армированного массива как фрагментов земляного полотна и основания, воспринимающих поездные нагрузки. С опорой на существующие результаты исследований в области армирования грунтов в моделях армирование формировалось в виде структурных элементов с известными механическими характеристиками. В статье выполнена оценка зон армирования эксплуатируемой высокой насыпи при высокой деформативности основной площадки, разработана и обоснована модель усиления инъектированием твердеющих растворов, определена зависимость деформационных характеристик усиленного массива от параметров армирования.

К.В. Меренченко в своей работе [14] описывает повышение стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения. По результатам экспериментальных работ расширена сфера применения существующей математической модели прогнозирования остаточных деформаций пути, определены основные причины возникновения периодических неровностей пути на подходе к искусственным сооружениям и параметры, влияющие на их интенсивность, разработан и обоснован критерий выбора длины участка переменной жесткости в зависимости от

скорости движения, определено различие возникновения и развития остаточных деформаций при въезде и съезде с искусственных сооружений.

В.М. Кругловым в статье [15] обсуждаются вопросы, относящиеся к устройству свайных фундаментов зданий и сооружений, в том числе мостов и других объектов транспортного назначения. Отмечается, что развитие строительной индустрии способствует совершенствованию технологии сооружения свайных фундаментов и существенному снижению экономических затрат.

Совершенствование конструкций и технологии сооружения свайных фундаментов является одной из основных задач и в области транспортного строительства. Эффективность свайных фундаментов обусловлена более полным использованием несущей способности грунтового основания и прочности элементов фундамента.

Ю.Г. Козьминым в статье [16] рассмотрены особенности динамического взаимодействия неоднородных по структуре и разным по общему весу и длине поездов с мостовым сооружением методом численного моделирования в программном комплексе Midas Civil. Верификация расчетной модели осуществлена по динамическим параметрам пролетных строений (частотам собственных колебаний), которые были определены при обследовании моста с использованием системы Тензор-МС. В своей работе, посвященной совершенствованию конструкции сопряжения путепроводов с насыпями подходов в условиях Вьетнама, для расчета сопряжения насыпи земляного полотна с искусственными сооружениями используется модель специфических грунтов, учитывающая их периодическое водонасыщение. Отмечается, что проблемы неровности и образования трещин в асфальтобетонном покрытии на сопряжении с мостовым сооружением существуют давно и характерны для большинства стран. Это связано с недостатками конструктивных решений узла сопряжения устоев с грунтовой насыпью примыкающей дороги или улицы. Трещины в покрытии проезжей части сразу же за устоями балочных пролетных строений обусловлены возникающими под нагрузками угловыми и линейными перемещениями концов пролетных строений. Просадка грунта за устоями мостов обусловлена разной вертикальной жесткостью устоя с опирающимся на него пролетным строением и грунта насыпи подхода, уложенного и уплотненного во время строительства сооружения.

Согласно данным американских специалистов, явление просадок насыпи подхода наблюдается в 25 % всех мостов, для ремонта которых потребуется не менее 100 млн \$. По данным исследования мостовых сооружений в северных и южных провинциях Франции около 70 % мостов имеют недостатки в виде просадок в местах сопряжения с подходами, а

около 44 % из них имеют значительные неравномерные оседания грунта насыпи подхода. Такие явления требуют проведения постоянных наблюдений за местами сопряжений и срочного устранения просадок, поскольку они отрицательно влияют на безопасность движения и характер работы несущих конструкций под подвижными нагрузками. Для снижения просадок грунта требуются новые технические решения, как например, применение интегральных и полуинтегральных устоев по концам мостовых сооружений, нашедших применение в некоторых развитых странах в последние годы. В таких устоях интегрированы функции опорных частей за счет высокой гибкости стальных свай, переходной плиты, забетонированной совместно с телом устоя и собственно устоя, жестко связанного с пролетным строением.

В статье [18] рассматривается сложный механизм взаимодействия грунта со структурой обычного интегрального моста (или полуинтегрального моста) и отмечаются такие проблемы как возрастающие горизонтальные результирующие силы грунта на каждой опоре и образование осадочного желоба рядом с каждой опорой (или каждой торцевой диафрагмой полуинтегрального моста) во время его эксплуатации. Они могут привести к значительному повреждению конструктивных элементов моста и высоким затратам на техническое обслуживание и/или устранение неисправностей. В статье разработана новая и простая концепция полуинтегрального устоя, которая может в значительной степени уменьшить возмущение почвы за устоем при тепловом перемещении и, таким образом, создать устойчивую и простую систему структуры грунта. Успешная эксплуатация первого полуинтегрального моста в Китае доказала, что новый полуинтегральный упор безопасен и поэтому настоятельно рекомендуется использовать его при проектировании всех новых мостов.

Постановка задачи и метод решения

Research objective and solution method

Анализ доступных автору публикаций показал, что в них не рассматривалось поведение зон сопряжения насыпи с искусственными сооружениями с учетом температурного воздействия. В этих работах практически не создавались математические модели зон сопряжения, базирующиеся на современных программных комплексах.

Использовавшиеся методы расчета и их недостатки проанализированы в статьях [19; 20], где на основе проведенного анализа разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния зоны сопряжения подходной насыпи с искусственным сооружением, на которую получено свидетельство № 0690 от 28.03.2023 ЦСПУПОС.СВ690-23.

Кроме того, анализ вышеперечисленных работ в том числе и иностранных авторов показал, что проведенные изыскания носят экспериментальный характер, полученные данные по просадкам участков переменной жесткости основываются преимущественно на полевых исследованиях и использовании узконаправленных моделей для определения жесткости конструкции. Разработанная автором компьютерная модель, с ее комплексным подходом к определению жесткости в зависимости от температуры окружающей среды обладает более широкими возможностями и может эффективно использоваться для поиска наиболее эффективных схем усиления подходных насыпей в зоне переменной жесткости буронабивными сваями.

В связи с этим целью настоящей статьи является демонстрация функциональных возможностей математической модели, разработанной автором [20], для моделирования с учетом температурного режима усиления подходной насыпи земляного полотна перед искусственными сооружениями методом установки буронабивных свай в теле земляного полотна, а также в выборе рационального расположения свайного поля с учетом эксплуатационных особенностей участка сопряжения.

При этом были решены следующие задачи:

1. Определен оптимальный шаг размещения усиливающих свай на участках переменной жесткости перед искусственными сооружениями в зависимости от условий эксплуатации заданного участка.
2. Смоделирована схема обустройства участка переменной жесткости путем увязки обустройства переходной плиты со свайным полем.
3. По результатам теоретических исследований получены решения по эффективному укреплению участков переменной жесткости в зависимости от климатических особенностей участка строительства.
4. Определен ряд основных параметров, необходимых для оценки эффективности схемы укрепления насыпи земляного полотна.

Для проведения расчетов эффективности применения буронабивных свай при определении жесткости насыпи была применена, как уже говорилось, математическая модель, базирующаяся на программном комплексе Midas GTX NX [20]. Модель рассчитываемой подходной железнодорожной насыпи представляет собой грунтовый массив, данные о механических характеристиках грунтов которого приведены в таблице 1. На насыпи смоделирована временная нагрузка С-14 [19; 20]. Физическая модель грунтового массива и свай строится методом конечных элементов, задаются временные и постоянные нагрузки, задается модель материала, а

также задается модель внешних температурных воздействий. Грунтовый массив моделируется объемными тетраэдрическими конечными элементами. В целях исключения искажения результатов и получения более точных значений напряжений и деформаций выбраны следующие размеры конечных элементов для элементов модели: для элементов, моделирующих слои глины, суглинка, супеси и песка от 3 м до 1 м; для элементов, моделирующих насыпь, балласт, РШР и водопропускную трубу от 1 м до 0,25 м.

Сваи моделируются набором стержневых конечных элементов с размерами, соответствующими толщинам прорезаемых ими слоев. Моделирование работы сваи в грунте осуществляется посредством встроенных функций midas GTS, с помощью которых осуществляется добавление упругих связей между объемными тетраэдрическими конечными элементами и стержневыми конечными элементами.

Таблица 1 / Table 1

Механические характеристики двух типов грунтов подходной насыпи

Mechanical characteristics of two soil types of approach embankment

№ грунта Soil number	Толщина слоя, м Layer thickness, m	Вид грунта Soil type	Удельный вес грунта, кН/м ³ Soil specific weight, kN/m ³	Угол внутреннего трения, φ° Angle of internal friction φ°	Сцепление с, кПа Adhesion c, kPa	Модуль деформации, мПа Modulus of deformation, mPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	Коэффициент Пористости Porosity coefficient
1	25	суглинок полутвердый semi-rigid clayed soil	18	24,4	32,05	20	0,35	0,67
2	5	песок средней крупности concrete sand	18	35	1	32,5	0,25	0,63

Тело земляного полотна смоделировано максимально приближенно к реально эксплуатируемым. Верхнее строение пути условно принято, как грунт № 2 с толщиной — 0,6 м. Составлено автором / The body of the roadbed is modeled as close as possible to those actually in use. The upper structure of the track is conventionally accepted as soil No. 2 with a thickness of 0,6 m. Compiled by the author

Результаты расчетного анализа

Calculation analysis results

Предварительная апробация модели представлена в [20], причем установлено, что исследование зоны переменной жесткости целесообразно производить при более высоких рабочих температурах и потому дальнейшие расчеты будут производиться при условной температуре +30С⁰.

Функциональные возможности модели представлены на рисунках 2–8. В процессе расчетного анализа определена осадка железнодорожной насыпи, причем расчет производился для случая эксплуатации при температуре +30 градусов Цельсия. Для определения наиболее рационального расположения усиливающих свай в насыпи, нужно задать несколько схем расположения свай в свайном поле, выполнить расчет напряженно-деформированного состояния, а затем путем сопоставления результатов определить наиболее рациональное расположение усиливающих свай.

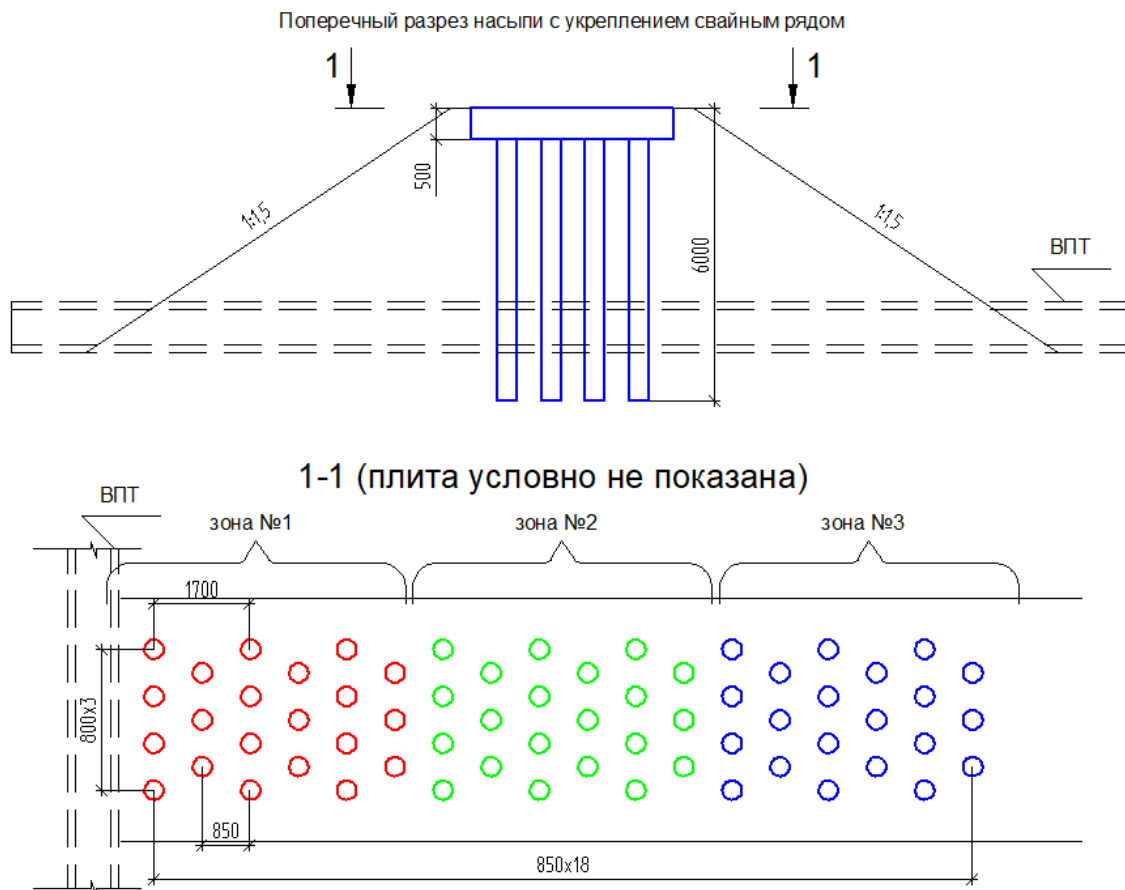


Рисунок 1. Схема расстановки свай диаметром 350 мм на переходном участке (зона № 1 обозначены сваи глубиной 12 м, зона № 2 — 9 м, зона № 3 — 6 м) для иллюстрации функционала математической модели с использованием программного комплекса было подготовлено 5 схем, в результате определена наиболее рациональная схема расположения свайного поля, что отображено на рисунках 1–9, при создании модели водопропускная труба принята как условно жесткая конструкция (разработано автором)

Figure 1. Piles configuration diagram of 350 mm diameter on the transition section (zone 1 is marked with 12 m deep piles, zone 2—9 m, zone 3—6 m) to illustrate the mathematical model functionality 5 diagram were prepared using the software package, as a result the most rational pile field configuration diagram was determined, which is shown in figures 1–9, when creating the model the pipe-culvert was taken as a conditionally robust construction (developed by the author)

Рисунок 1 иллюстрирует схему расположения свайного поля, при расчетном анализе определялись следующие параметры:

- Вертикальные перемещения плиты свайного ростверка.
- Максимальные напряжения в свайном ростверке кН мм^2 перед искусственными сооружениями.
- Максимальные напряжения в свайном ростверке кН мм^2 .
- Максимальные усилия в сваях при прохождении поезда.
- Относительное ускорение мм/сек^2 .
- Перемещение по оси z .
- Нормальные напряжения свайного интерфейса.

Ниже на рисунках 2–9 приведены результаты расчетов, причем для наглядности плита ростверка снята.

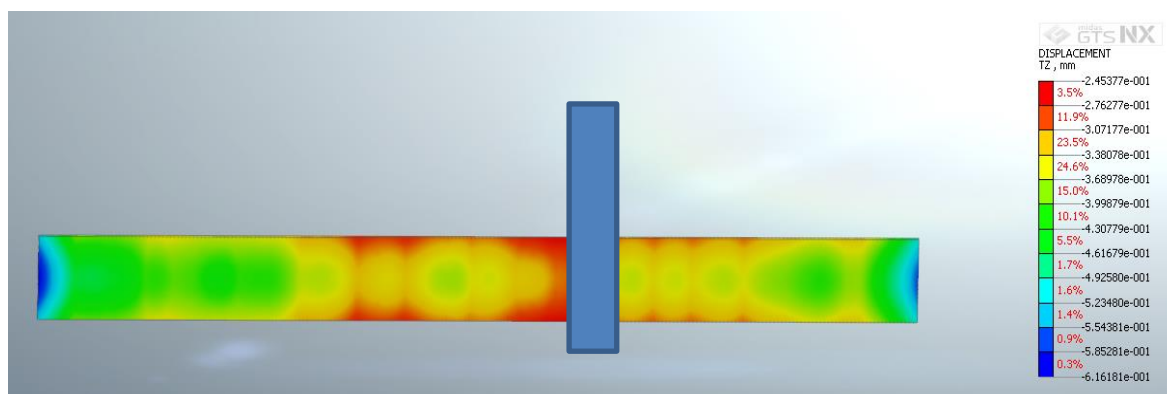


Рисунок 2. Вертикальные перемещения плиты свайного ростверка в момент прохождения поезда (разработано автором)

Figure 2. Pile cap mat vertical offsets at the moment of train passage (developed by the author)

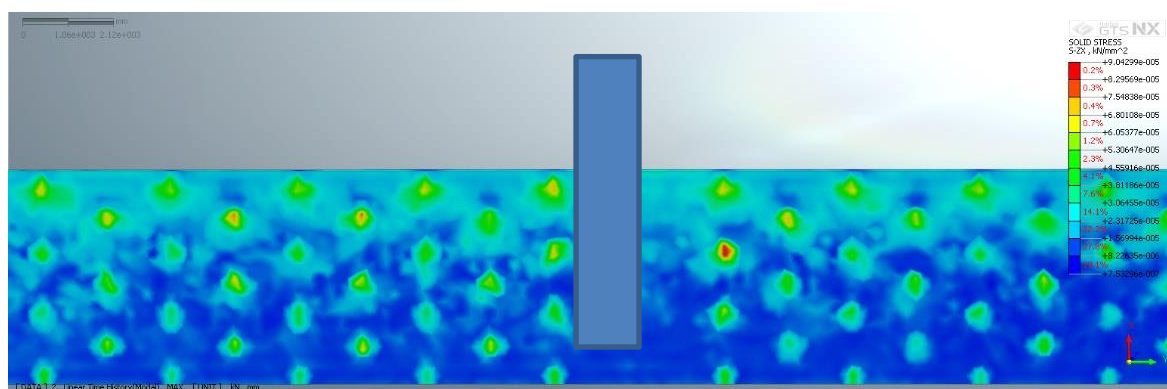


Рисунок 3. Максимальные напряжения в свайном ростверке кН/мм^2 перед искусственными сооружениями, при прохождении поезда (разработано автором)

Figure 3. Maximum stresses in the pile grid кН/мм^2 in front of the engineering structures when the train passes (developed by the author)

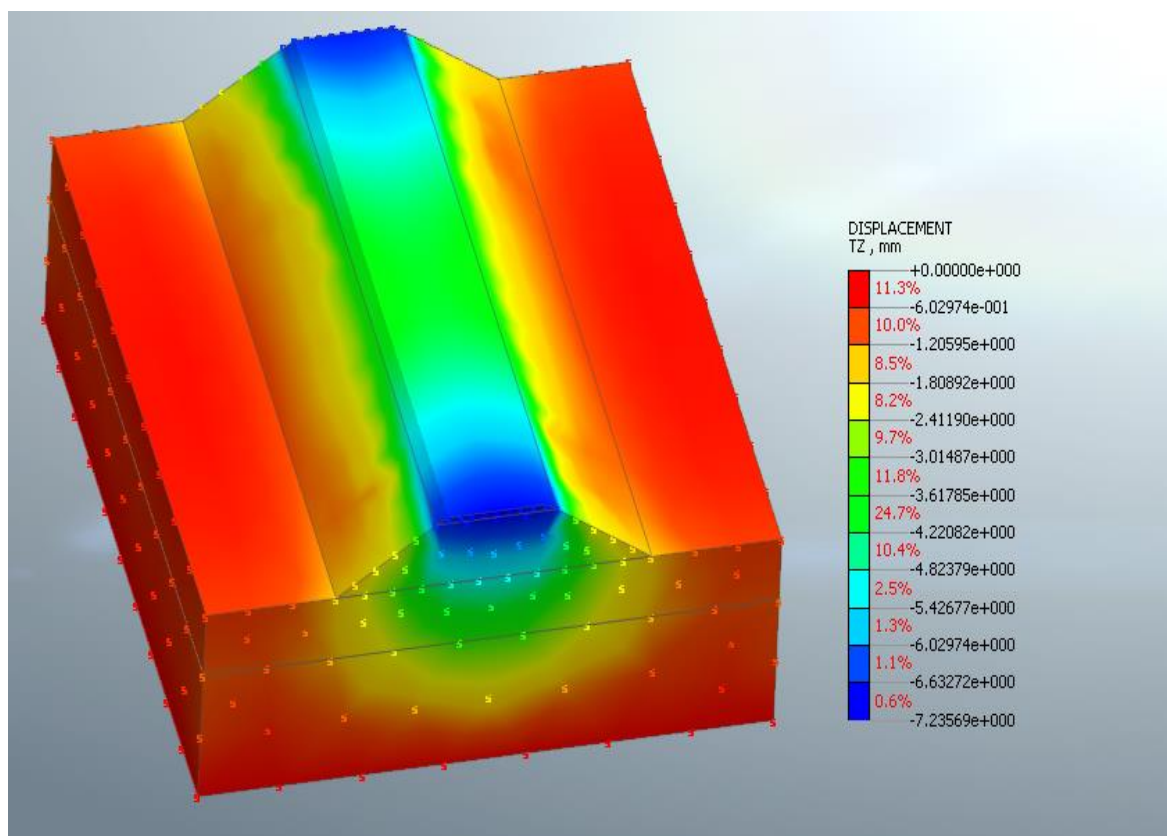


Рисунок 4. Объемная эпюра перемещений.
Температура массива +30 градусов. Сваи присутствуют (разработано автором)

Figure 4. Volumetric displacement epure. The temperature of the mass is +30 degrees centigrade. Piles are present (developed by the author)

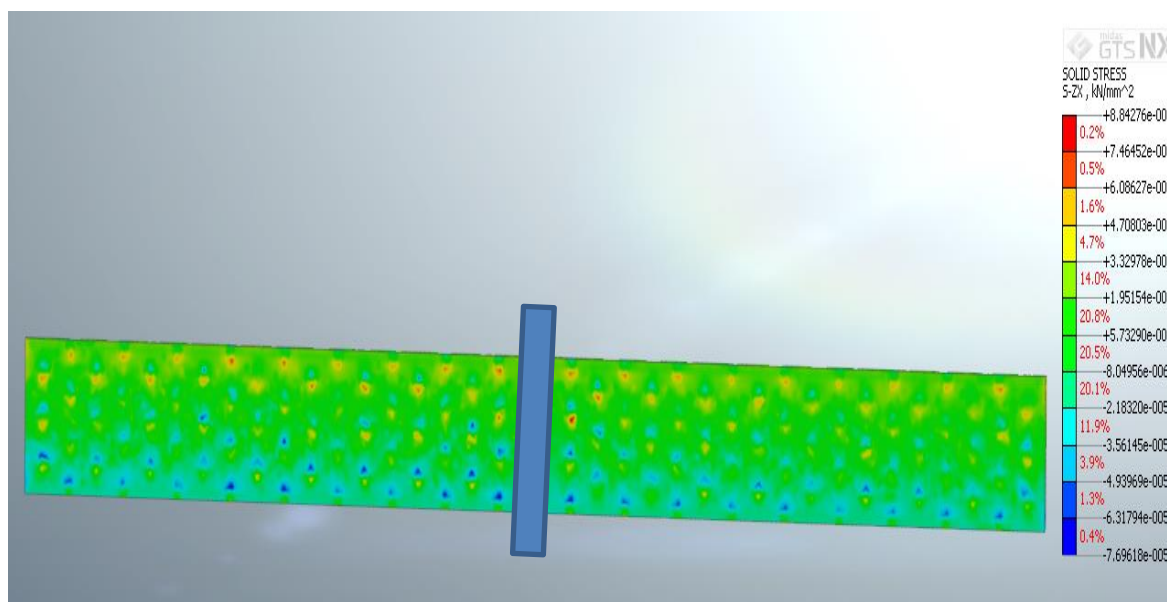


Рисунок 5. Максимальные напряжения в свайном
ростверке кН мм², при прохождении поезда (разработано автором)

Figure 5. Maximum stresses in the pile
grid kN mm², during train passage (developed by the author)

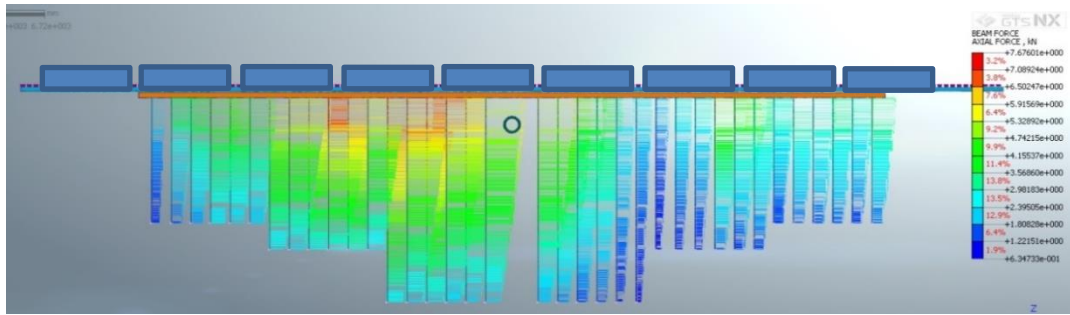


Рисунок 6. Максимальные напряжения в свайном ростверке kN mm^2 эпюра макс напряжений + состав. Движение состава происходит справа на лево (разработано автором)

Figure 6. Maximum stresses in the pile grid kN mm^2 max stresses epure + train. The train movement is from right to left (developed by the author)

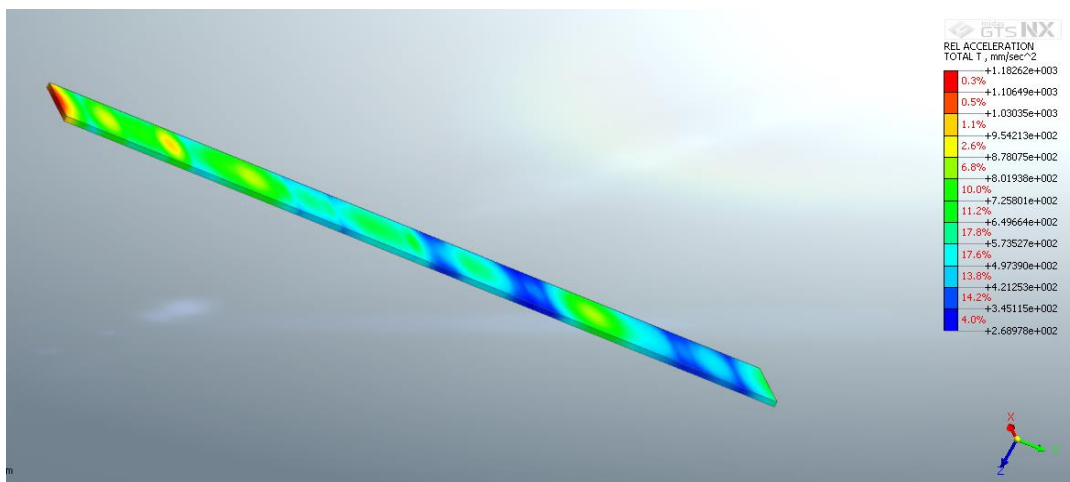


Рисунок 7. Относительное ускорение мм сек.^2 эпюра ускорений точек плиты ростверка плита ускорение точек (разработано автором)

Figure 7. Relative acceleration mm sec.^2 acceleration points epure of the cap plate (developed by the author)

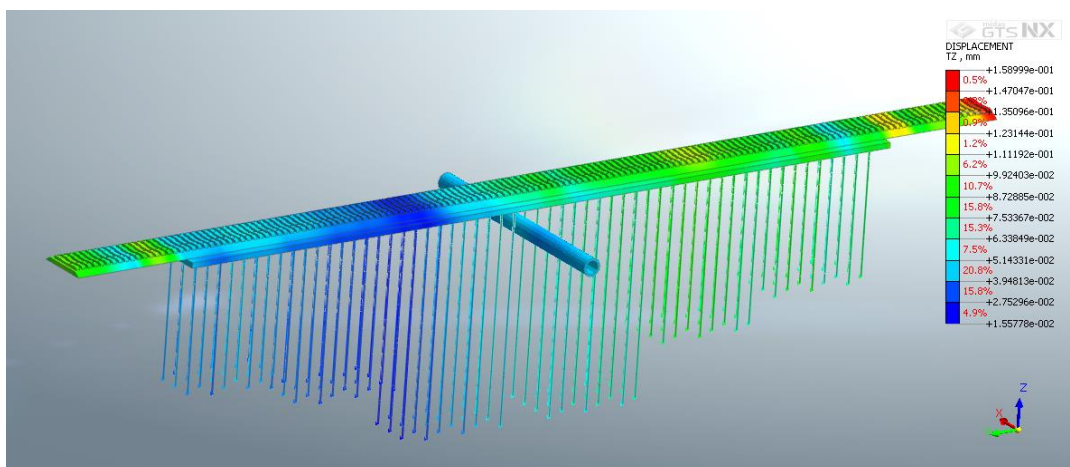


Рисунок 8. Динамические перемещения по оси z при скорости состава $v = 60 \text{ км/ч}$ (разработано автором)

Figure 8. Dynamic displacements along z-axis at train speed $v = 60 \text{ km/h}$ (developed by the author)

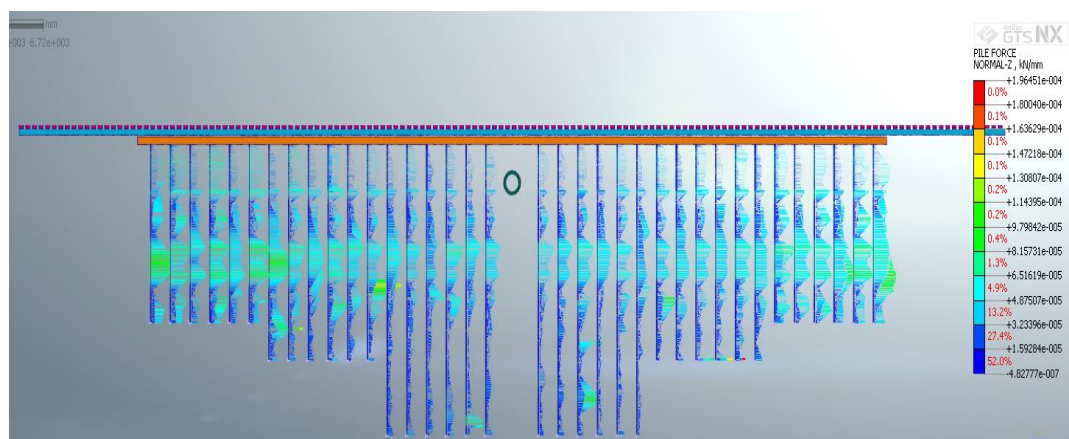


Рисунок 9. Нормальные напряжения в свайном поле (разработано автором)

Figure 9. Normal stresses in the pile field (developed by the author)

Полученные данные по анализу жесткости участка сопряжения указывают на возможность применения модели для анализа зоны сопряжения с искусственными сооружениями и выбора рациональной расстановки свайного поля.

В процессе математического моделирования установлено, что расстановка шага свай, их глубина и диаметр не оказывают существенного влияния на результаты работы подходной насыпи при экстремально низких температурах, поэтому расчет и производился для температурного режима +30 градусов Цельсия, что отражает работу насыпи в реальных условиях для 5 и 4 ДКЗ.

Результаты расчета показали, что в зоне непосредственного воздействия на искусственное сооружение максимальные перемещения составили 2,4 мм, против 7,5 мм на границе с участком укрепления.

Заключение и выводы

Summary and conclusions

В статье проиллюстрированы функциональные возможности математической модели участка переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям. Установлено, что ее можно использовать для анализа участка сопряжения с искусственными сооружениями, причем применение этой модели позволяет путем вариантного проектирования (вариантного перебора различных схем компоновки свайного поля и его глубины в зависимости от температурного режима местности), а также выбрать наиболее эффективную схему размещения свай. Результаты расчета с использованием не только статической, но и динамической модели будет полезно использовать для выбора более экономичной схемы укрепления подходной насыпи к искусственным сооружениям, так как наиболее неблагоприятная ситуация возникает именно при прохождении

поезда, а не во время его вероятного отстоя на месте сопряжения насыпи с искусственным сооружением.

Модель позволяет снимать обширное количество параметров состояния конструкции искусственного сооружения и состояния земляного полотна, а также перемещения и деформации верхнего строения пути. В зависимости от необходимости, сложности конструкции и особых условий эксплуатации, — оператор самостоятельно подбирает необходимый перечень наблюдаемых параметров и их величины в зависимости от поставленной задачи и требуемых величин по снижению воздействий от подвижного состава на искусственное сооружение.

Использование разработанной математической модели позволит повысить эффективность использования свайного поля для усиления участков переменной жесткости как на уже существующих, так и на вновь строящихся объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта и автомобильных дорогах.

Приношу слова благодарности профессору, доктору технических наук Ланису Алексею Леонидовичу и профессору, доктору технических наук Овчинникову Игорю Георгиевичу — которые внесли значительный вклад в мое исследование.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Журавлев, М.М.** Сопряжение проезжей части автодорожных мостов с насыпью / М.М. Журавлев. — М.: Транспорт, 1976. — 81 с.
2. **Ашпиз, Е.С.** Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта. — 2012. — Т 10. — № 5. — С. 112–119. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18060100>. — EDN PFFLGH. (дата обращения: 17.10.2023).
3. **Замуховский, А.В.** Экспериментальное обследование участков переменной жесткости / А.В. Замуховский, К.В. Меренченко // Мир транспорта. — 2013. — Т 11. — № 3. — С. 74–82. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20296881>. — EDN RCEBSR. (дата обращения: 17.10.2023).
4. **Ланис, А.Л.** К вопросу разработки конструкции участка насыпи переменной жесткости на подходах к мосту / А.Л. Ланис, К.В. Востриков, Д.А. Разуваев // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути, Москва, 04–05 апреля 2012 года / Москва: Московский государственный университет путей сообщения, 2012. — С. 185–188. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25465601>. — EDN VLGWBX. (дата обращения: 17.10.2023).
5. **Ланис, А.Л.** Сопряжение подходных насыпей с мостами и путепроводами / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов. — DOI [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120) // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2016. — № 2. — С. 110–120. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/294/0>. — EDN VTNXNZ. (дата обращения: 17.10.2023).
6. **Стоянович, Г.М.** Опыт комплексного геофизического обследования объектов железнодорожной инфраструктуры / Г.М. Стоянович, В.В. Пупатенко, Ю.А. Сухобок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2012. — № 1. — С. 282–287. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17764764>. — EDN OYTKJN. (дата обращения: 17.10.2023).

7. **Ланис, А.Л.** Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, Д.А. Усов. — DOI https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_58_104 // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 3. — С. 104–111. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47208627>. — EDN FKKNWQ. (дата обращения: 17.10.2023).
8. **Шапиро, Д.М.** Теория и расчет оснований обсыпных устоев автодорожных мостов / Д.М. Шапиро, А.П. Тютин. — DOI <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.3.11> // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2019. — Т 10. — № 3. — С. 104–116. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/695>. — EDN QOWTYS. (дата обращения: 17.10.2023).
9. **Шапиро, Д.М.** Метод конечных элементов в строительном проектировании: монография / Д.М. Шапиро. — Изд. 2-е исп. и доп. — М.: АСВ, 2020. — 172 с.
10. **Lanis, A.** Design of Railway Tracks in the Zone of Subgrade Adjoint to Strengthened Bridge Abutments / A. Lanis, D. Usov, D. Razuvaev, I. Grebennikov. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_113 // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 года. Vol. 402-1 / Швейцария: Springer Nature Switzerland AG, 2021. — С. 1035–1043. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48421113>. — EDN FZUMLS. (дата обращения: 17.10.2023).
11. **Колос, И.В.** Проблемы повышения осевых нагрузок и скоростей движения поездов на участках распространения слабых грунтов / И.В. Колос, Е.С. Свинцов, Г.М. Стоянович [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. — 2017. — № 4. — С. 26–31. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32657392>. — EDN YTEPTV. (дата обращения: 02.11.2023).
12. **Ланис, А.Л.** Сопряжение подходов насыпей с мостами и путепроводами / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов. — DOI [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120) // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2016. — № 2. — С. 110–120. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/294>. — EDN VTNXNZ. (дата обращения: 02.11.2023).
13. **Ланис, А.Л.** Армирование основной площадки высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов / А.Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3. — С. 38–46. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41379566>. — EDN VLWKWW. (дата обращения: 02.11.2023).
14. **Ланис, А.Л.** Подход к подбору параметров конструкций переменной жесткости в зоне примыкания к устоям искусственных сооружений / А.Л. Ланис, Д.А. Усов, П.О. Ломов, И.О. Гребенников. — DOI https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_143 // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 1. — С. 143–152. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48276614>. — EDN NLICIP. (дата обращения: 02.11.2023).
15. **Дубинин, В.Г.** Свая высокой несущей способности / В.Г. Дубинин, А.А. Пискунов, В.М. Круглов. — DOI <https://doi.org/10.15862/26SATS319> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 3. — С. 26SATS319. — URL: <https://t-s.today/26SATS319.html>. — EDN DLXXFK. (дата обращения: 02.11.2023).
16. **Ефимов, С.В.** Моделирование динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожных мостов / С.В. Ефимов, К.О. Жунев. — DOI <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-154-166> // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2020. — Т 22. — № 6. — С. 154–166. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/856>. — EDN EOHSCY. (дата обращения: 02.11.2023).
17. **Jin, X.** A New Category of Semi-integral Abutment in China / X. Jin, X. Shao, W. Peng, B. Yan. — DOI <https://doi.org/10.2749/101686605777963071> // Structural Engineering International. — 2005. — Т 15. — № 3. — С. 186–188. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686605777963071>. (дата обращения: 02.11.2023).
18. **Yannotti, A.P.** New York State Department of Transportation's Experience with Integral Abutment Bridges / A.P. Yannotti, S. Alampalli, H.L. White // Integral Abutment and Jointless Bridges (IAJB 2005), March 16–18, 2005, Baltimore, Maryland / Балтимор: Б.И., 2005. — С. 41–49. — URL: <https://trid.trb.org/view/850724>. (дата обращения: 02.11.2023).
19. **Церех, С.Г.** Статический и динамический анализ сопряжения искусственного сооружения с подходной насыпью / С.Г. Церех, И.Г. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15862/03SATS120> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 1. — С. 03SATS120. — URL: <https://t-s.today/03SATS120.html>. — EDN TVWISV. (дата обращения: 02.11.2023).

20. **Церех, С.Г.** Методика расчета железнодорожной подходной насыпи к искусственным сооружениям с учетом температурного воздействия и взаимодействия усиливающих свай с грунтом / С.Г. Церех, И.Г. Овчинников. — DOI https://doi.org/10.46973/9785907295803_2023_230 // Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры: Сборник научных трудов V Всероссийской национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–17 февраля 2023 года / Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. — С. 230–234. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53947134>. — EDN YRPCRU. (дата обращения: 02.11.2023).

Сведения об авторах:

Церех Станислав Геннадьевич — ассистент, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, e-mail: tserekh@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7728-2777>

Статья получена: 03.12.2023. Принята к публикации: 19.01.2024. Опубликовано онлайн: 05.02.2024.

REFERENCES

1. Zhuravlev M.M. Sopryazheniye proyezzhey chasti avtodorozhnykh mostov s nasy'yu [Connecting the carriageway of road bridges with the embankment]. Moscow: Transport; 1976. (In Russ.).
2. Ashpiz E.S., Zamuhovskiy A.V. Substantiation of Deformability Standards. *Mir Transporta (World of Transport and Transportation) Journal*. 2012; 10(5): 112–119. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18060100> (accessed 17th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Zamuhovskiy A.V., Merenchenko C.V. Experimental Monitoring of Sections of Variable Stiffness. *Mir Transporta (World of Transport and Transportation) Journal*. 2013; 11(3): 74–82. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20296881> (accessed 17th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Lanis A.L., Vostrikov K.V., Razuvaev D.A. [On the issue of developing the design of an embankment section of variable stiffness on the approaches to the bridge]. In: *[Modern problems of design, construction and operation of railway tracks, Moscow, April 04–05, 2012]*. Moscow: Moscow State University of Communications of the Emperor Nicholas II; 2012. P. 185–188. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25465601> (accessed 17th October 2023). (In Russ.).
5. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Lomov P.O. Conjugation of approach fill with bridge and overbridge. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; (2): 110–120. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120).
6. Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V., Sukhobok Yu.A. The Experience of Complex Geophysical Investigation at The Railway Infrastructure Sites. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012; (1): 282–287. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17764764> (accessed 17th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of Thawing Soils on The Deformation Top of Subgrade. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021; (3): 104–111. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_58_104.
8. Shapiro D.M. Theory and calculation of road bridges buried abutments bases. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(3): 104–116. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.3.11>.
9. Shapiro D.M. Metod konechnykh elementov v stroitel'nom proyektirovanii: monografiya [Finite element method in construction design: monograph]. Moscow: ASV; 2020. (In Russ.).
10. Lanis A., Usov D., Razuvaev D., Grebennikov I. Design of Railway Tracks in the Zone of Subgrade Adjoint to Strengthened Bridge Abutments. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, 11–14 may 2021. Vol. 402-1*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2021. p. 1035–1043. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48421113> (accessed 17th October 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_113.

11. Kolos I.V., Svyntsov Ye.S., Stoyanovich G.M., Gorev A.E., Govorov V.V. The Issues of Axle Loading Increase and Train Speed at Light Soil Railroad Sections. *Bulletin of Scientific Research Result*. 2017; (4): 26–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32657392> (accessed 2nd November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Lomov P.O. Conjugation of Approach Fill with Bridge and Overbridge. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; (2): 110–120. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2\(48\)-110-120](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-2(48)-110-120).
13. Lanis A.L. Reinforcement of the Main Roadbed of a High Embankment with The Pressure Injection of Solidifying Solutions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019; (3): 38–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41379566> (accessed 2nd November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Lanis A.L., Usov D.A., Lomov P.O., Grebennikov I.O. Approach to the Selection Parameters of Variable Rigidity Structures in The Zone of Connection with Plates of The Artificial Structures. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2022; (1): 143–152. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2022_1_143.
15. Dubinin V.G., Piskunov A.A., Kruglov V.M. Pile of high bearing capacity. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(3): 26SATS319. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/26SATS319>.
16. Efimov S.V., Zhunev K.O. Finite Element Model of Dynamic Train-Bridge Interaction. *Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22(6): 154–166. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-154-166>.
17. Jin X., Shao X., Peng W., Yan B. A New Category of Semi-integral Abutment in China. *Structural Engineering International*. 2005; 15(3): 186–188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/101686605777963071>.
18. Yannotti A.P., Alampalli S., White H.L. New York State Department of Transportation's Experience with Integral Abutment Bridges. In: *Integral Abutment and Jointless Bridges (IAJB 2005), March 16–18*. Baltimore, Maryland: 2005. p. 41–49. Available at: <https://trid.trb.org/view/850724> (accessed 2nd November 2023). (In Eng.).
19. Tserekh S.G., Ovchinnikov I.G. Static and dynamic analysis of the interface between the transport structure and the approached embankment. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(1): 03SATS120. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS120>.
20. Tserekh S.G., Ovchinnikov I.G. Methodology for Calculation of Railway Approach Embanking to Artificial Structures Taking into Account the Tempiratory Impact and Interaction of Reinforcing Piles with Soil. In: *[Innovative technologies in construction and management of the technical condition of infrastructure: Collection of scientific papers of the V All-Russian National Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, February 16–17, 2023]*. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2023. p. 230–234. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53947134> (accessed 2nd November 2023). DOI: https://doi.org/10.46973/9785907295803_2023_230.

Information about the authors:

Stanislav G. Tserekh — Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia,
e-mail: tserekh@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7728-2777>

Submitted: 3rd December 2023. Revised: 19th January 2024. Published online: 5th February 2024.