

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

2022, №2, Том 9 / 2022, N 2, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-2-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS222.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS222 (<https://doi.org/10.15862/02SATS222>)

Восстановление несущей способности свайного фундамента моста для обеспечения его эксплуатационной надёжности

¹Афанасьев В.С., ²Харченко А.И.,

¹Идиатулин Д.Р., ³Минмуллин А.Р., ¹Шайхутдинова Р.А.

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

³АО «Мосинжпроект», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шайхутдинова Регина Алексеевна, e-mail: Regina22121995@mail.ru

Аннотация. В статье представлен метод восстановления несущей способности свайных фундаментов как одна из составляющих комплексного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры. Приведены примеры систем контроля технического состояния мостов, изложены инновационные подходы к прочностному мониторингу. Применены новейшие технологии обследования и расчета свайного фундамента на примере одной из опор железнодорожного моста.

Испытательной лабораторией выполнены работы по обследованию конструкции свай после окончания строительных работ по сооружению свайного фундамента опор моста. Требовалось определение сплошности бетона свай и наличия раковин и разуплотнений в теле бетона. Был произведен расчет несущей способности свайного основания и определены расчетные нагрузки.

В работе приведены расчетные модели свайного фундамента, внешние нагрузки, порядок производства работ. Гидрологические условия были взяты из предоставленной проектной документации из отчета по инженерно-геологическим изысканиям.

При анализе расчетов было выявлено увеличение коэффициента использования прочности сечения в «пустотной» зоне свай с учетом строительства и дальнейшей эксплуатации моста, требующее специальных мероприятий по усилению свайного фундамента.

Далее приведены мероприятия по восстановлению несущей способности свайного фундамента, краткое описание технологии буринъекционных работ, после проведения которых был выполнен расчет несущей способности свайного основания с учетом закрепления грунтового массива и усиления свай.

В конце работы сделан вывод о целесообразности проделанных мероприятий и об обеспечении несущей способности и эксплуатационной надёжности свай фундамента мостового сооружения.

Ключевые слова: свайный фундамент моста; численное моделирование; напряженно-деформированное состояние; грунтовый массив; технологический регламент; проект производства работ

Restoration of the bearing capacity of the pile foundation of the bridge to ensure its operational reliability

¹Vladimir S. Afanasev, ²Aleksey I. Harchenko,
¹Danil R. Idiatulin, ³Aidar R. Minmullin, ¹Regina A. Shaykhutdinova

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

³Mosinzhproekt, Moscow, Russia

Corresponding author: Regina A. Shaykhutdinova, e-mail: Regina22121995@mail.ru

Abstract. The article presents a method for restoring the bearing capacity of pile foundations as one of the components of comprehensive monitoring of transport infrastructure facilities. It gives examples of systems for the technical condition monitoring of bridges, and outlines innovative approaches to strength monitoring. Using one of the piers of a railway bridge as an example, the latest technologies of survey and calculation of the pile foundation are applied.

The testing laboratory performed work on the survey of the piles structure after completing the pile foundation construction for the bridge piers. The concrete continuity of piles and the presence of void pockets and decompaction in the concrete were to be determined. The bearing capacity of the pile footing was calculated and the design loads were determined.

The study provides design models of the pile foundation, external loads, and the method statement. Hydrological conditions corresponded to those referred to in design documentation being part of the report on geological engineering surveys.

The analysis of calculations revealed an increase in the sectional strength utilization rate in the “hollow” zone of the pile, taking into account the construction and further operation of the bridge, calling for special measures to strengthen the pile foundation.

Then, the measures to restore the bearing capacity of the pile foundation and a brief description of the drill and inject technology are given. Upon completion of the drill and inject operations, the bearing capacity of the pile footing was calculated taking into account the stabilization of the soil mass and the pile strengthening.

At the end of the study, the conclusion about the feasibility of the measures taken and on securing the bearing capacity and operational reliability of the bridge foundation piles is made.

Keywords: pile foundation of the bridge; numerical simulation; strain-stress distribution; soil mass; process regulations; method statement

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



Введение

Introduction

В современном мире мостостроение является неотъемлемой частью формирования транспортной инфраструктуры. К мостовым сооружениям предъявляются эксплуатационные, экономические, экологические, архитектурные и расчетно-конструктивные требования¹. Перед застройщиком часто встают разного рода задачи, решение которых невозможно без применения нестандартных технических подходов [1].

Сооружение фундамента моста — трудоемкий процесс, для которого рассматриваются различные способы, такие как сооружение свайного фундамента, фундамента мелкого заложения и др. [2–4]. Свайные фундаменты часто устраивают с помощью ударного и вибрационного способа погружения. Строительство фундаментов опор мостов над водой местности осуществляется в более сложных условиях, чем на суходоле. Сложность возведения таких фундаментов заключается в необходимости применения специальных устройств ограждения котлованов от воздействия воды, а также доставки механизмов, материалов, специальных конструкций к месту выполнения работ на весь период строительства².

Для того, чтобы обеспечивать безопасность и долговечность мостовых сооружений путем своевременного обнаружения повреждений и их устранения, необходимо проводить непрерывный мониторинг. В своей работе «Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений» И.Г. Овчинников описывает систему непрерывного мониторинга мостовых сооружений — системы наблюдения за условиями работы и поведения мостовой конструкции, направленной на обеспечение сохранения его функциональных потребительских свойств в заданных пределах, осуществляемой на непрерывной, длительной основе с использованием измерительной аппаратуры и обеспечивающей представление информации о состоянии конструкции в реальном режиме времени [5–6].

¹ Вайтович О.М. Мосты и трубы. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-232-2011; 2012, Минск, Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь; с. 198.

² Мойсейчик Е.К., Мацкевич А.С. Строительство свайных фундаментов на акватории: уч.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов дорожных специальностей; 2005, Минск, БНТУ, 2004; 41 с.

Мониторинг технического состояния мостовых конструкций является актуальной задачей, которая заключается в эффективном контроле, надежном анализе, рациональной интерпретации данных, а также обеспечении правильного принятия решений по эффективному управлению мостовой инфраструктурой [7–8].

На сегодняшний день по всему миру активно разрабатываются технологии контроля технического состояния мостов, позволяющие оценивать их состояние без непосредственного доступа к конструкции и нарушения движения [9].

С развитием информационных компьютерных технологий, совершенствованием измерительной техники, появляется возможность создания систем непрерывного мониторинга сооружений как на строящихся, так и на эксплуатируемых объектах. Система непрерывного мониторинга позволяет в течение длительного времени получать информацию о напряженно-деформированном состоянии мостового сооружения, об обращающихся нагрузках, различных воздействиях и других показателях эксплуатации сооружения и принимать эффективные решения по эксплуатации сооружения³.

При непрерывном мониторинге мостовых сооружений повышается эффективность расходования средств на проведение ремонтных мероприятий путем своевременного обнаружения повреждений и корректного определения времени и вида необходимого ремонта или реконструкции. Про реконструкцию мостовых сооружений в своих работах писали Бокаев С.А., Казарян В.Ю. и другие авторы [10–14].

А.Н. Стасишина в своей работе «Выбор рационального способа реконструкции свайных фундаментов» говорит о том, что при реконструкции свайного фундамента применяется целый комплекс мер, направленный на его усиление и повышение несущей способности. Выбор конкретной технологии усиления производится после глубокого исследования конструкций, и в зависимости от того, что послужило причиной возникновения дефектов фундамента, осуществляется выбор конкретного и рационального способа его усиления. Одним из важных критериев выбора рациональной технологии усиления фундаментов является соотношение прочности и экономичности, что способствует не только восстановлению несущей способности фундамента, но и возможности экономии материалов и снижения трудозатрат [15].

³ Овчинников И.Г., Козлов И.Г. Управление эксплуатацией мостовых сооружений. Учебное пособие; 1998, Саратов, Изд-во СГТУ; 92 с.

В представленной работе рассмотрено восстановление несущей способности свайного фундамента для обеспечения его эксплуатационной надёжности на примере железнодорожного моста. По проекту свайный фундамент моста состоит из четырех железобетонных буронабивных свай диаметром 1,2 м и длиной 20 м, объединенных между собой монолитным ростверком. Конструкция фундамента моста показана на рисунке 1.

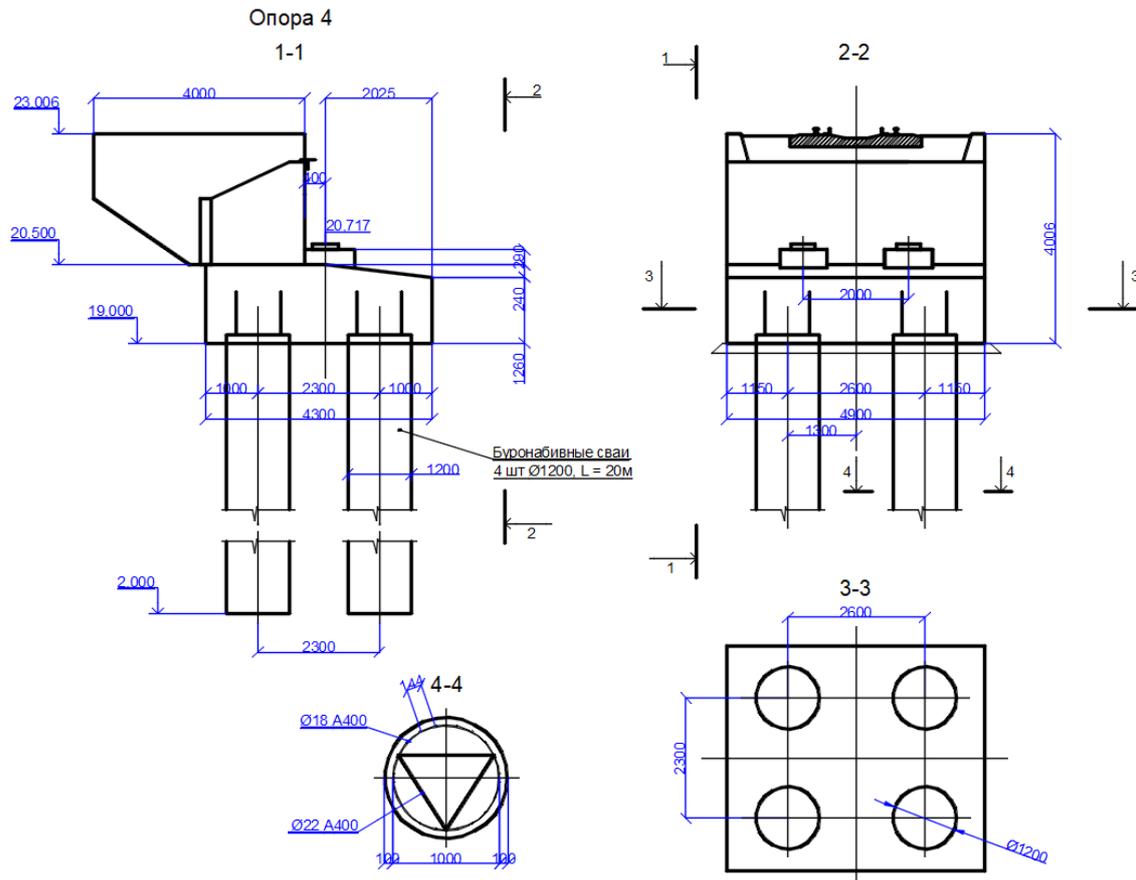


Рисунок 1. Общий вид опоры № 4 (составлено автором)

Figure 1. General view of support No. 4 (compiled by the author)

После окончания строительных работ по сооружению свайного фундамента на опоре № 4 испытательной лабораторией проведены работы по обследованию конструкций свай. Целью испытаний являлось определение сплошности бетона свай и наличия раковин и разуплотнений в теле бетона. Проведённое обследование конструкции свай показало, что на опоре № 4 буронабивной сваи № 4.1 обнаружено нарушение сплошности бетона на глубине 19,0–20,10 м от верха сваи.

Расчет несущей способности свайного основания

Calculation of the bearing capacity of the pile foundation

Основные положения общей методики расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) свайного основания с грунтовым массивом

The main provisions of the general methodology for calculating the stress-strain state (SSS) of a pile foundation with a soil massif

Моделирование и расчёт несущей способности свай велись при помощи расчетного комплекса программ «PLAXIS 3D». В основу комплекса положен метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий выполнять математическое моделирование процессов, протекающих в грунте.

Для моделирования работы грунта использована модель «Мора-Кулона». Рассматриваемая модель грунта формируется в виде зависимостей бесконечно малых приращений эффективных напряжений (скорости эффективных напряжений) и бесконечно малых приращений деформации (скорости деформации).

Основной принцип решений упругопластических задач заключается в том, что деформации и их скорости разделяются на упругие и пластические составляющие.

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл},$$

ε_y — упругая составляющая относительной деформации;

$\varepsilon_{пл}$ — пластическая составляющая относительной деформации.

Для установления закономерности между величинами напряжений и упругими деформациями используется закон Гука:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon_y = D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{пл}),$$

D — матрица жесткости упругого материала.

Для модели «Мора-Кулона» задаются следующие основные прочностные и упругие характеристики грунтов:

E — модуль Юнга [кН/м²];

ν — коэффициент Пуассона;

φ — угол внутреннего трения [град.];

c — сцепление [кН/м²].

Физико-механические характеристики грунтов в расчетной модели принимаются на основании результатов инженерно-геологических изысканий для расчетных значений с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ (для расчетов по первой группе предельных состояний).

Сваи опор моста задаются геометрическими объектами с характеристиками материалов, поведение которых описывается моделью Линейной упругости. Эта модель представляет собой закон Гука об изотропной линейной упругости и включает в себя два основных параметра: модуль Юнга E [кН/м²], коэффициент Пуассона ν .

Параметры прочности для интерфейсов задаются в зависимости от характеристик грунта на контакте и в соответствии с рекомендациями п. 9.16⁴:

- удельное сцепление $s_k = 0$;
- угол трения по конструкции $\delta = \gamma_k \varphi$, где
 φ — угол внутреннего трения грунта;
 γ_k — коэффициент условий работы по таблице 9.1.

Поровое давление воды, характеризующее гидростатические условия, устанавливается в соответствии с уровнями грунтовых вод (УГВ).

Сбор нагрузок

Collection of loads

В расчетах учтены наиболее неблагоприятные ситуации, воздействия и нагрузки:

- Учтена нагрузка на опоры моста и основания в наихудшем сочетании постоянных и временных нагрузок по I-й группе предельных состояний.
- В соответствии с⁵ в расчетах учитывались сочетания постоянных и временных нагрузок: постоянные нагрузки + временные вертикальные + горизонтальные ветровые на пролетное строение + горизонтальная ветровая на тело опоры.
- Временные вертикальные нагрузки от подвижного ж.д. состава, приняты в соответствии с приложением К⁶.

⁴ СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

⁵ СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

⁶ СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

Наибольшее расчётное усилие, передаваемое на фундаменты в уровне подошвы сваи составляет 215,4 т (2112 кН).

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) свайного основания с грунтовым массивом

Modeling of the stress-strain state (SSS) of a pile foundation with a soil massif

Построение расчетных моделей, учитывающих конструкции строящихся опор, внешние нагрузки, порядок производства работ, напластование грунта и гидрологические условия, выполнены на основе предоставленной проектной документации и в соответствии с отчетом по инженерно-геологическим изысканиям.

Согласно результатам проведенной ультразвуковой дефектоскопии по контролю сплошности свай:

- на глубине от 19,0 до 20,1 м от верха сваи находится разуплотненный участок бетона сваи;
- пустотность тела сваи составляет порядка 90 %.

Для задания параметров кластеров «пустотной» зоны сваи, был вычислен приведенный Модуль Юнга:

$$E_{\text{прив}} = E_{B25} * 0,1 = 30000 * 0,1 = 3000 \text{ МПа.}$$

Модуль деформации закреплённого массива принят для глин $E = 60$ МПа, суглинков $E = 500$ МПа, супеси, песка пылеватого и мелкого $E = 2000$ МПа, песка средней крупности $E = 3000$ МПа, для песка гравелистого $E = 4000$ МПа.

Программный комплекс «PLAXIS 3D» позволяет исследовать изменения напряженно-деформируемого состояния (НДС) грунтового массива и конструкций сооружений на каждой стадии.

Определение усилий и деформаций конструкций сооружений производилось поэтапно, в соответствии со следующими стадиями строительства:

- *исходная стадия* — на данной стадии определялись НДС грунтового массива до начала строительных работ;
- *строительная стадия* — на данной стадии определялись НДС грунтового массива и свай опоры;
- *эксплуатационная стадия* — на данной стадии определялись НДС грунтового массива и свай опоры на период эксплуатации ж.д. путей с учетом временной вертикальной нагрузки от подвижного состава.

Геометрическая модель в трехмерной постановке представляет собой параллелепипед, соответствующий фрагменту грунтового массива шириной 40x40 м, глубиной 29,0 м. Весь параллелепипед разбит на определенные слои исходя из инженерно-геологических условий (рис. 2).

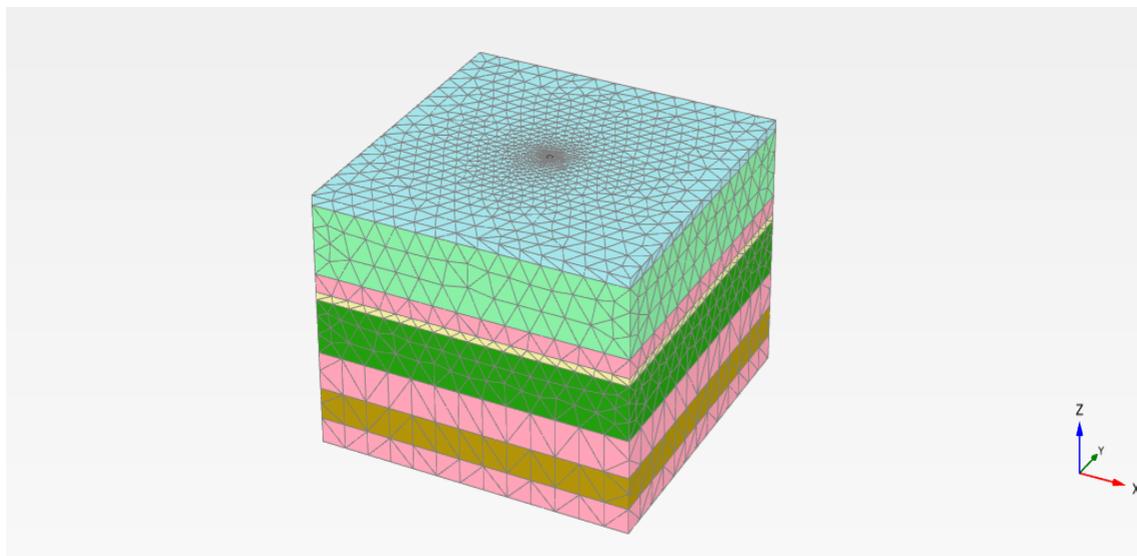


Рисунок 2. КЭ модель грунтового массива без закрепления грунтов (составлено автором)

Figure 2. FE model of a soil massif without soil fixing (compiled by the author)

Вид трехмерной расчетной модели приведен на рисунке 3.

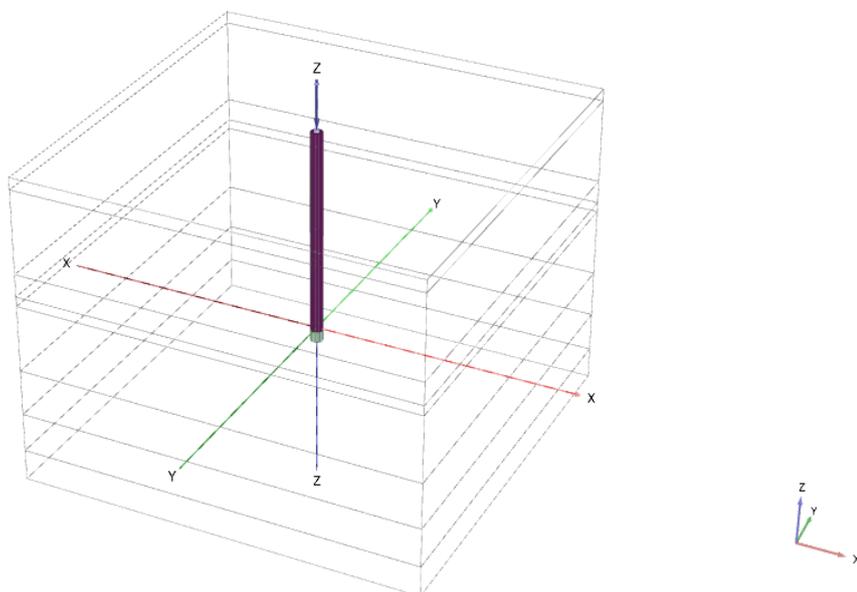


Рисунок 3. Расчётная схема сваи без закрепления грунтового массива (составлено автором)

Figure 3. Calculation scheme of a pile without fixing a soil mass (compiled by the author)

Изополя вертикальных перемещений грунтового массива со вмещающей свай, полученные в результате расчета на стадии эксплуатации представлены на рисунке 4.

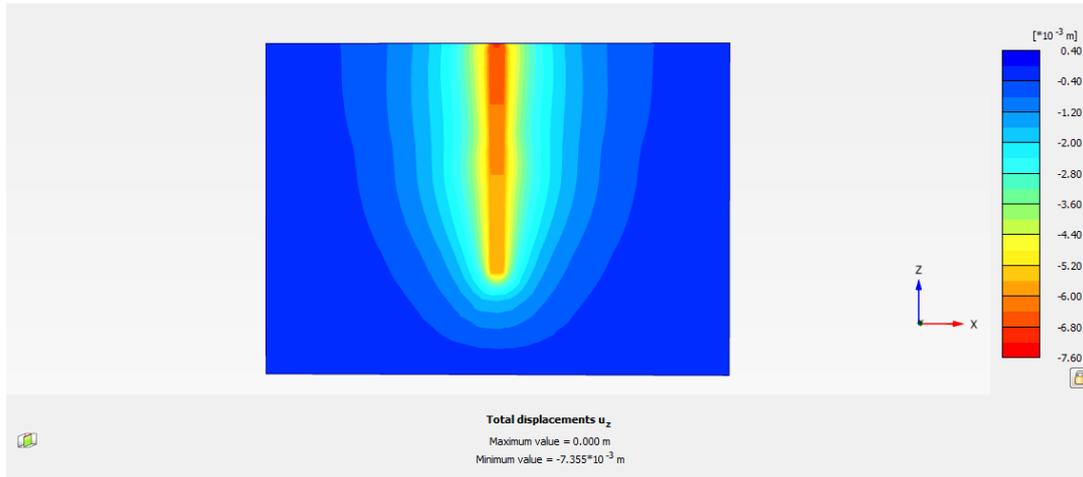


Рисунок 4. Вертикальные перемещения (от расчётных нагрузок) в грунтовом массиве без закрепления грунтов (составлено автором)

Figure 4. Vertical displacements (from design loads) in a soil mass without soil stabilization (compiled by the author)

Результат расчета на стадии эксплуатации вертикальных напряжений в свае и «пустотной» зоне сваи представлены на рисунках 5, 6.

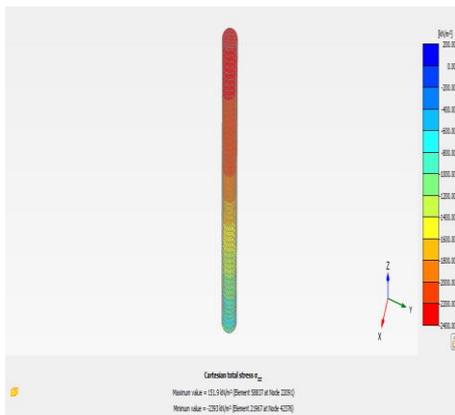


Рисунок 5. Вертикальные напряжения в свае без закрепления грунтов (составлено автором)

Figure 5. Vertical stresses in a pile without soil fixing (compiled by the author)

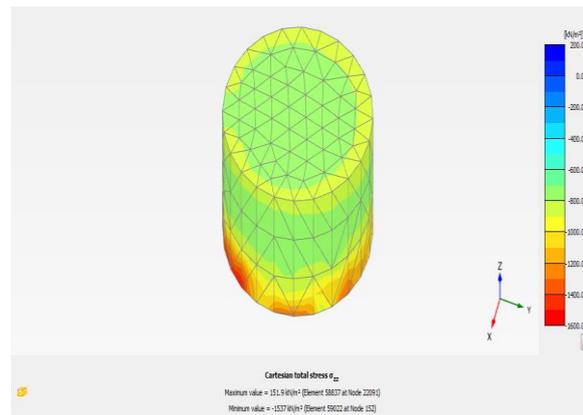


Рисунок 6. Вертикальные напряжения в «пустотной» зоне сваи без закрепления грунтов и усиления сваи (составлено автором)

Figure 6. Vertical stresses in the "void" zone of the pile without soil fixation and pile reinforcement (compiled by the author)

Анализ результатов расчёта

Analysis of calculation results

По результатам расчета вертикальные смещения сваи опоры моста без учета усиления основания составляют 7,4 мм (от расчётных нагрузок).

Максимальное значение вертикальных напряжений в теле сваи без учета усиления основания составляет 2393 кН/м².

Максимальное значение вертикальных напряжений в «пустотной» зоне сваи без учета усиления основания составляет 1537 кН/м².

Согласно⁷ расчётное сопротивление бетона сжатию для класса В25 — 14,5 МПа. Допускаемое напряжение в теле сплошной ж/б сваи:

$$[\sigma] = R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b3} = 14,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,85 = 12,325 \text{ МПа},$$

где γ_{b1} — для бетонных и железобетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивлений R_b и R_{bt} и учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки;

γ_{b2} — для бетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивления R_b и учитывающий характер разрушения таких конструкций;

γ_{b3} — для бетонных и железобетонных конструкций, бетонируемых в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования более 1,5 м, вводимый к расчетному значению сопротивления бетона R_b , $\gamma_{b3} = 0,85$;

Проверка по допускаемым напряжениям:

$$[\sigma] = 12,325 \text{ МПа} > \sigma = 2,393 \text{ МПа} \text{ — условие прочности выполняется.}$$

Допускаемое напряжение для «пустотной» зоны сваи:

$$[\sigma] = R_b \cdot k \cdot \gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b3} = 14,5 \cdot 0,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,85 = 1,2325 \text{ МПа},$$

где k — коэффициент пустотности, принимается равным 0.1, что соответствует 90 % пустотности;

γ_{b1} — для бетонных и железобетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивлений R_b и R_{bt} и учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки;

γ_{b2} — для бетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивления R_b и учитывающий характер разрушения таких конструкций;

γ_{b3} — для бетонных и железобетонных конструкций, бетонируемых в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования более 1,5 м, вводимый к расчетному значению сопротивления бетона R_b , $\gamma_{b3} = 0,85$.

Проверка для пустотной зоны сваи по допускаемым напряжениям:

$$[\sigma] = 1,2325 \text{ МПа} < \sigma = 1,537 \text{ МПа} \text{ — условие прочности не выполняется.}$$

Перегруз сечения составляет 25 %.

Выполненные расчёты показали, что значение коэффициента использования прочности сечения в «пустотной» зоне сваи с учетом

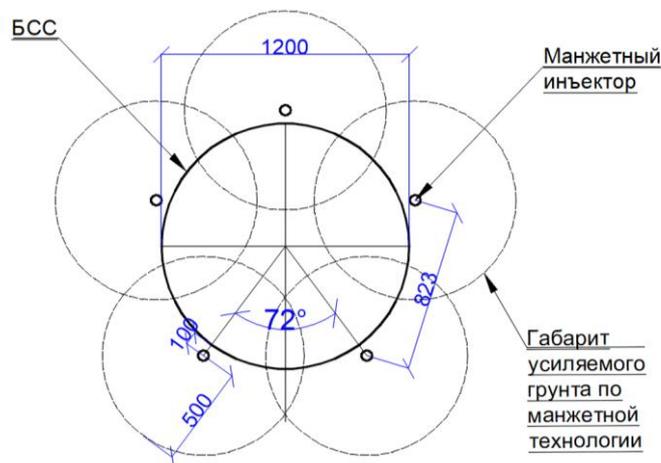
⁷ СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции».

строительства и дальнейшей эксплуатации моста составляет 1,25, что требует специальных мероприятий по усилению свайного фундамента.

Мероприятия по восстановлению несущей способности свайного фундамента

Measures to restore the bearing capacity of the pile foundation

В качестве мероприятий по восстановлению несущей способности буронабивной сваи применялось закрепление грунтового массива фундамента методом инъектирования. Данный метод представляет собой нагнетание специальных инъекционных смесей на основе микроцементов по манжетной технологии через предварительно установленные инъектора в грунтовой массиве.



*Рисунок 7. План инъекционных скважин
для буронабивной сваи № 4.1 (составлено автором)*

Figure 7. Plan of injection wells for bored pile No. 4.1 (compiled by the author)

Краткое описание технологии буроинъекционных работ

Brief description of drilling technology

Производство буроинъекционных работ по манжетной технологии с целью повышения несущей способности сваи состоит из следующих этапов:

1. Подготовительные работы (монтаж и наладка бурового, смесительного и нагнетательного оборудования).
2. Закладка металлических гильз в тело железобетонной конструкции для последующего бурения.
3. Алмазное сверление бетона или удаление остатков бетонной смеси из гильзы.

4. Бурение инъекционных скважин до проектной отметки с промывкой и подачей обойменного раствора через буровой став. Процесс бурения скважин сопровождается принудительной подачей бурового раствора, состоящего из бентонита, полимеров и других добавок для обеспечения устойчивости стенок скважин и выравнивания гидростатического давления на время производства работ. При достижении проектной длины бурения скважина заполняется обойменным раствором "Солидур" через буровую колонну, колонна извлекается, оставшийся в скважине раствор предотвращает обрушение скважины.

5. После извлечения буровой колонны устанавливается металлическая манжетная колонна. Производится проверка прочности обойменного раствора, выдержка раствора не менее 120 часов.

6. Приготовление и нагнетание с применением инъекционной смеси на основе микроцементов с высокой проникающей способностью в режиме пропитки.

Технологические параметры нагнетания:

- проектное давление нагнетания до 5 бар;
- проектная прочность (28 суток) инъекционного раствора на сжатие до 4,5 МПа.

7. Завершающие работы, ликвидация скважин. Ликвидация инъекционных скважин выполняется путём их тампонирования раствором с повышенной водонепроницаемостью и адгезией.

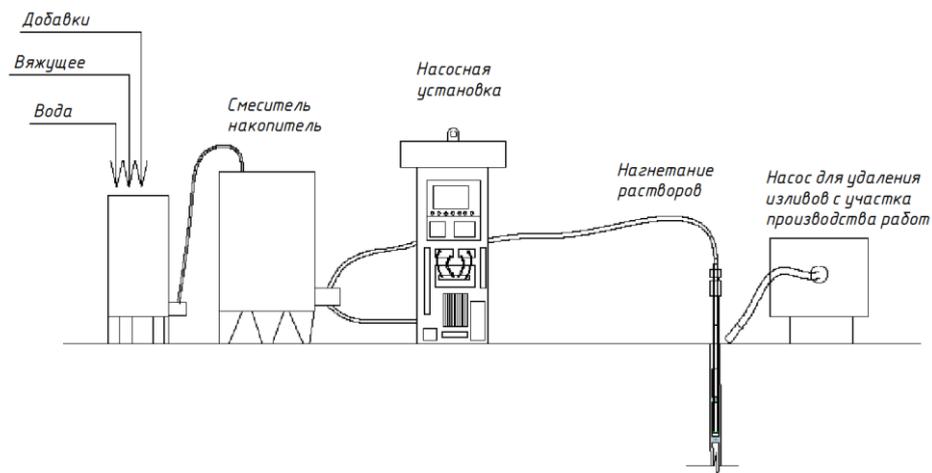


Рисунок 8. Схема технологического комплекса по нагнетанию (составлено автором)

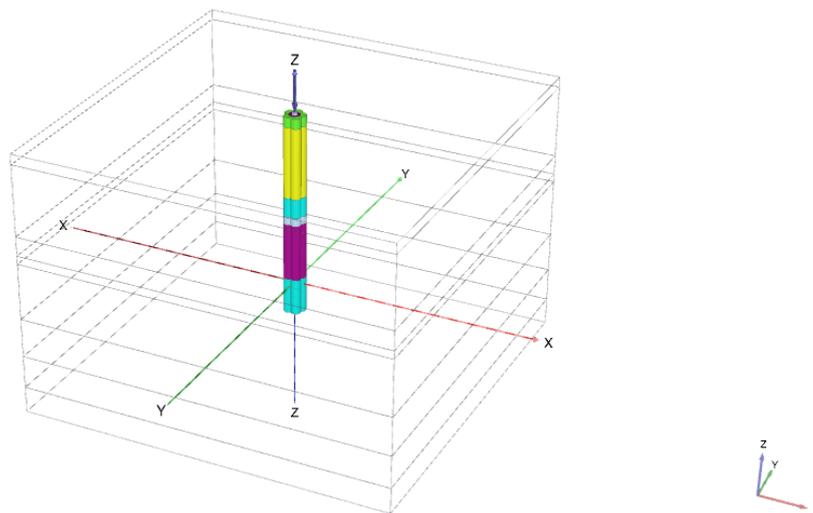
Figure 8. Scheme of the technological complex for injection (compiled by the author)

Для восстановления несущей способности буронабивной сваи № 4.1 было пробурено 5 вертикальных скважин по заданной сетке глубиной 22,5 м, с устройством целиком закрепленного грунта от поверхности земли до проектной отметки.

Расчёт несущей способности свайного основания с учетом закрепления грунтового массива и усиления свай

Calculation of the bearing capacity of the pile foundation, taking
into account the fixation of the soil massif and the strengthening of the piles

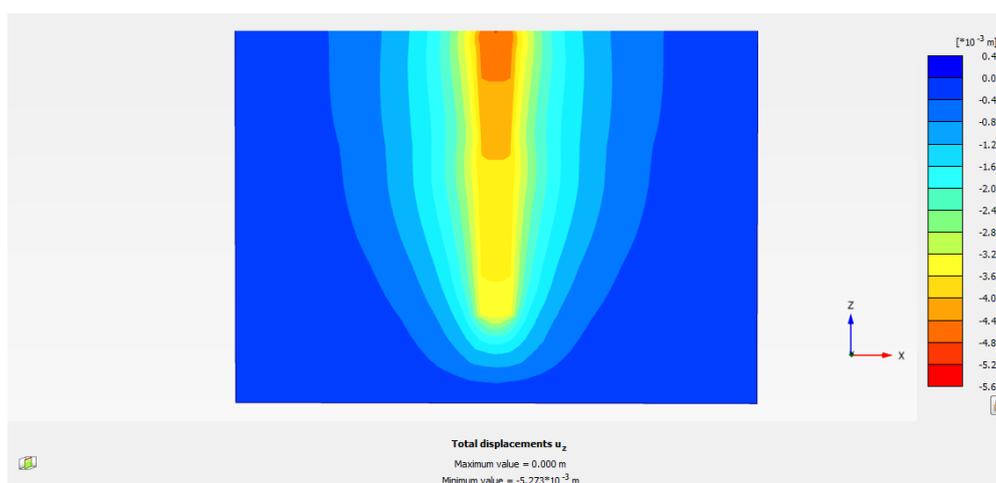
Расчётная схема сваи с учетом закрепления грунтового массива и
усилением сваи показана на рисунке 9.



*Рисунок 9. Расчётная схема сваи с учетом закрепления
грунтового массива и усилением сваи (составлено автором)*

*Figure 9. Calculation scheme of the pile, taking into account
the fixing of the soil massif and the strengthening of the pile (compiled by the author)*

По результатам расчета вертикальные смещения сваи опоры моста,
с учетом усиления основания составляют 5,3 мм от воздействия расчётных
нагрузок (рис. 10).



*Рисунок 10. Вертикальные перемещения от расчётных нагрузок
с учетом закрепления грунтового массива и усиления сваи (составлено автором)*

*Figure 10. Vertical displacements from design loads, taking into account
the fixing of the soil massif and the strengthening of the pile (compiled by the author)*

Максимальное значение вертикальных напряжений в теле сваи с учетом усиления основания составляет 2170 кН/м^2 показаны на рисунке 11.

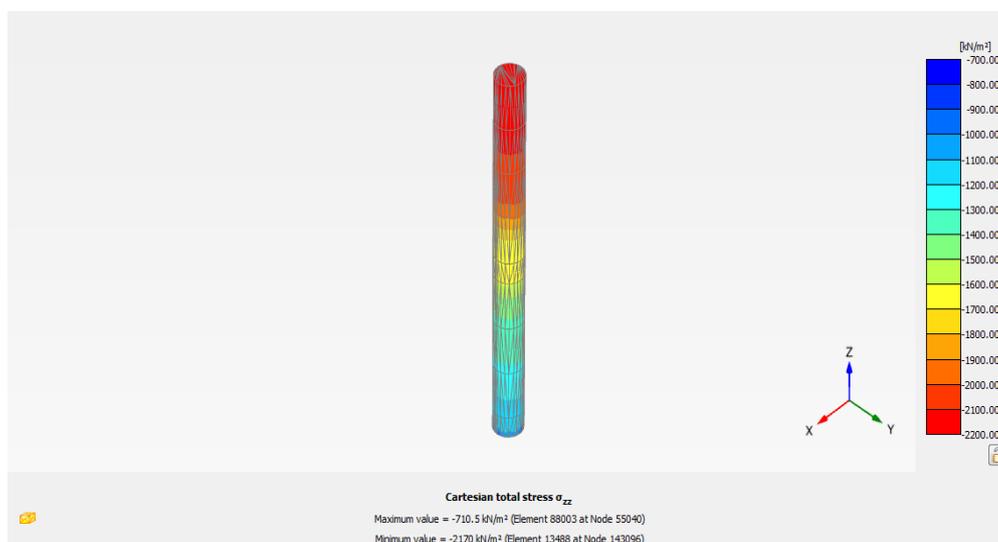


Рисунок 11. Вертикальные напряжения с учетом закрепления грунтового массива и усиления сваи (составлено автором)

Figure 11. Vertical stresses, taking into account the fixation of the soil mass and the reinforcement of the pile (compiled by the author)

Максимальное значение вертикальных напряжений в «пустотной» зоне сваи с учетом усиления основания составляет $728,9 \text{ кН/м}^2$ показаны на рисунке 12.

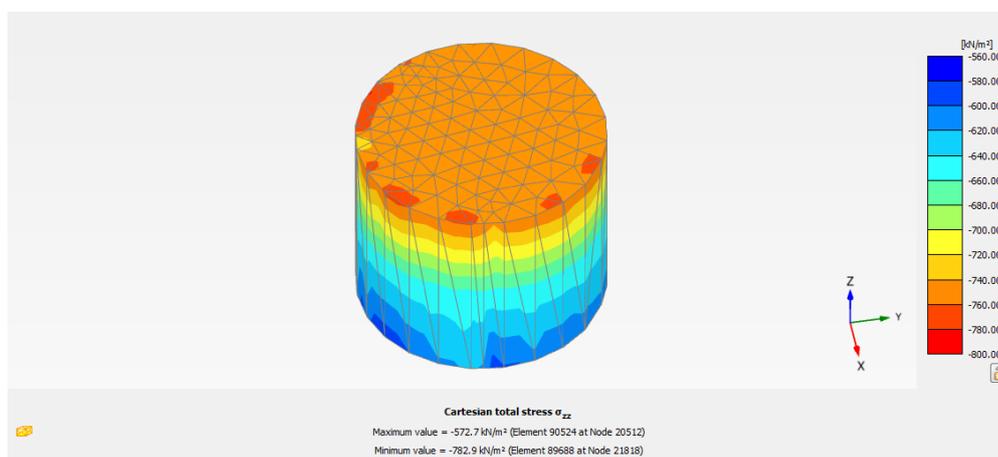


Рисунок 12. Вертикальные напряжения в «пустотной» зоне сваи с учетом закрепления грунтового массива и усиления сваи (составлено автором)

Figure 12. Vertical stresses in the "void" zone of the pile, taking into account the fixation of the soil mass and the strengthening of the pile (compiled by the author)

Максимальное значение вертикальных напряжений в укрепленном грунтовом массиве В7,5 составляет $750,7 \text{ кН/м}^2$ показаны на рисунке 13.

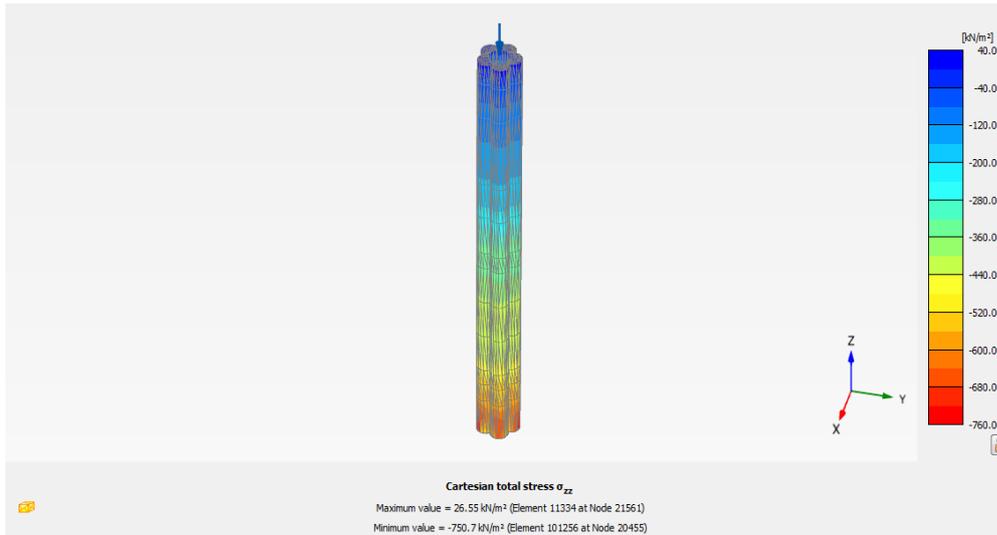


Рисунок 13. Вертикальные напряжения с учетом закрепления грунтового массива и усиления сваи (составлено автором)

Figure 13. Vertical stresses, taking into account the fixing of the soil massif and the reinforcement of the pile (compiled by the author)

Проверка для сплошной сваи по допускаемым напряжениям:

$$[\sigma] = 12,325 \text{ МПа} > \sigma = 2,170 \text{ МПа} \text{ — условие прочности выполняется.}$$

Проверка для пустотной зоны сваи по допускаемым напряжениям:

$$[\sigma] = 1,2325 \text{ МПа} > \sigma = 0,783 \text{ МПа} \text{ — условие прочности выполняется.}$$

Коэффициент использования сечения составляет 64 %.

Допускаемое напряжение для укрепленного массива В 7,5:

$$[\sigma] = R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b3} = 4,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 4,5 \text{ МПа}$$

где γ_{b1} — для бетонных и железобетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивлений R_b и R_{bt} и учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки;

γ_{b2} — для бетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивления R_b и учитывающий характер разрушения таких конструкций;

γ_{b3} — для бетонных и железобетонных конструкций, бетонируемых в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования более 1,5 м, вводимый к расчетному значению сопротивления бетона R_b , $\gamma_{b3} = 0,85$.

Проверка для закрепленного грунтового массива по допускаемым напряжениям:

$$[\sigma] = 4,5 \text{ МПа} > \sigma = 0,751 \text{ МПа} \text{ — условие прочности выполняется.}$$

Комплекс мероприятий по закреплению грунтов и усилению свай обеспечил несущую способность и эксплуатационную надежность свай, что подтверждается результатами расчета.

Выводы

Conclusion

1. Выполненные расчёты до закрепления грунтового массива показали, что значение коэффициента использования прочности сечения в «пустотной» зоне сваи с учетом строительства и дальнейшей эксплуатации моста составляет 1,25, что требует специальных мероприятий по усилению свайного фундамента для обеспечения эксплуатационной надежности фундамента.
2. После выполнения комплекса мероприятий по закреплению грунтов и усилению свайного фундамента, коэффициент использования прочности сечения сваи составил 0,64, что обеспечивает несущую способность и эксплуатационную надежность свай фундамента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Разживина, А.Э.** Мостовые сооружения вантового типа / А.Э. Разживина, А.Н. Соболева // Alfabuild. — 2018. — Т. 5. — № 3. — С. 76–85. — URL: <https://alfabuild.spbstu.ru/article/2018.5.6/> (дата обращения: 24.01.2022).
2. **Емельянова, Г.А.** К вопросам проектирования фундаментов опор мостов с использованием металлических труб большого диаметра в условиях многолетнемерзлых грунтов / Г.А. Емельянова, Я.А. Сагайдачный // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: Материалы IV Национальной научно-практической конференции, Астрахань, 08 февраля 2021 года / Под общей редакцией Т.В. Золиной Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. — С. 328–330. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45689929> (дата обращения: 24.01.2022).
3. **Смолин, Ю.П.** К вопросу о строительстве фундаментов автодорожного моста через Р. Москву на трассе Краснопресненского проспекта / Ю.П. Смолин, В.Ф. Скоркин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2010. — № 23. — С. 17–26. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21062792> (дата обращения: 24.01.2022).
4. **Беталгериев, С.М.** Об особенностях устройства свайных фундаментов мостов по национальному стандарту / С.М. Беталгериев // Перспективы развития строительного комплекса : Материалы XIV Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, Астрахань, 22–23 октября 2020 год / Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. — С. 281–284. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44609810> (дата обращения: 24.01.2022).
5. **Овчинников, И.Г.** Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.И. Нигаматова, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/01TS114> // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2014. — Т 1. — № 1. — С. 01TS114. — URL: <https://t-s.today/01TS114.html> (дата обращения: 24.01.2022).

6. **Овчинников, И.Г.** Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.И. Нигаматова, Е.С. Михалдыкин. — DOI <https://doi.org/10.15862/01TS214> // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2014. — Т 1. — № 2. — С. 01TS214. — URL: <https://t-s.today/01TS214.html> (дата обращения: 24.01.2022).
7. **Sumitono, S.** Long span bridge health monitoring system in Japan / S. Sumitono, Y. Matsui, M. Kono, T. Okamoto, K. Fujii. — DOI <https://doi.org/10.1117/12.435628> // 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 2001 / Ньюпорт-Бич, Калифорния, США: International Society for Optics and Photonics, 2001. — С. 517–524. — URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4337/1/Long-span-bridge-health-monitoring-system-in-Japan/10.1117/12.435628.short?SSO=1> (дата обращения: 12.02.2022).
8. **Shridhar, K.P.** Structural Health Monitoring and Strengthening Of Bridges / K.P. Shridhar, P.J. Salunke, N.G. Gore. — DOI <https://doi.org/10.7753/IJSEA0405.1015> // International Journal of Science and Engineering Applications. — 2015. — Т 4. — № 5. — С. 309–313. — URL: <https://ijsea.com/archieve/volume4/issue5/ijsea04051015> (дата обращения: 12.02.2022).
9. **Koh, H.-M.** Development and application of health monitoring system for bridges in Korea / H.-M. Koh, S.P. Chang, S.-K. Kim, C.-Y. Kim, W.J. Kim // Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14. 17 July, 2002 / Барселона: IABMAS, 2002.
10. **Казарян, В.Ю.** Уширение и усиление опор при реконструкции мостовых сооружений / В.Ю. Казарян, И.Д. Сахарова // Транспортное строительство. — 2017. — № 8. — С. 4–7. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30025667> (дата обращения: 12.02.2022).
11. **Рябухин, А.К.** Исследование особенностей реконструкции мостов в руслах рек / А. К. Рябухин, Е.Р. Бовтик, С.А. Соколова // Актуальные вопросы строительства: конструкции, технологии, экономика: Сборник статей по материалам конференции архитектурно-строительного факультета, Краснодар, 17 февраля 2021 года. / Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. — С. 80–83. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48022434&pff=1> (дата обращения: 12.02.2022).
12. **Ягофаров, Х.М.** Реконструкция пролетного строения моста по консольно-балочной схеме / Х.М. Ягофаров, А.Х. Ягофаров, А.В. Разумов // Наука и безопасность. — 2011. — № 1. — С. 41–44. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23028286> (дата обращения: 12.02.2022).
13. **Письмак, А.В.** Проблемы реконструкции железобетонных мостов рамных и балочно-неразрезных систем / А.В. Письмак // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2013. — № 4. — С. 55–60. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21165709> (дата обращения: 12.02.2022).
14. **Федотов, М.Ю.** К вопросу мониторинга несущих металлических конструкций мостов с использованием волоконно-оптических датчиков / М.Ю. Федотов, М.Л. Лоскутов, И.С. Шелемба, А.В. Колесников, И.Г. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15862/11SATS318> // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2018. — Т 5. — № 3. — С. 11SATS318. — URL: <https://t-s.today/11SATS318.html> (дата обращения: 12.02.2022).
15. **Сташишина, А.Н.** Выбор рационального способа реконструкции свайных фундаментов / А.Н. Сташишина, М.И. Абу Махади // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2016. — № 2. — С. 91–96. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26178646> (дата обращения: 12.02.2022).

Сведения об авторах:

Афанасьев Владимир Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: a89162825980@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2080-5490>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=916780

Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: iharchenko@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3850-4285>

Идиатулин Данил Русланович — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: idiatulindanil@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3872-543X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1047894

Минмуллин Айдар Ринатович — инженер, АО «Мосинжпроект», Москва, Россия,
e-mail: kazan-aidar@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5453-2449>

Шайхутдинова Регина Алексеевна — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: Regina22121995@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6967-6055>

Статья получена: 15.03.2022. Принята к публикации: 14.04.2022. Опубликовано онлайн: 27.04.2022.

REFERENCES

1. Razzhivina A., Soboleva A. Pontilice of cable structure. *Alfabuild*. 2018; 5(3): 76–85. Available at: <https://alfabuild.spbstu.ru/article/2018.5.6/> (accessed 24th January 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Emel'yanova G.A., Sagaydachnyy Ya.A. [On the issues of designing foundations for bridge supports using large-diameter metal pipes in permafrost conditions]. In: Zolina T.V. (eds.). *Innovative development of regions: the potential of science and modern education: Proceedings of the IV National Scientific and Practical Conference, Astrakhan, February 08, 2021*. Astrakhan: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. p. 328–330. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45689929> (accessed 24th January 2022). (In Russ.).
3. Smolin Yu.P., Skorkin V.F. [On the issue of building the foundations of a road bridge across the Moscow River on the Krasnopresnensky Prospekt route]. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2010;(23): 17–26. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21062792> (accessed 24th January 2022). (In Russ.).
4. Betalgeriyev S.M. [On the features of the installation of pile foundations of bridges according to the national standard]. In: *Prospects for the development of the construction complex: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference of Faculty, Young Scientists and Students, Astrakhan, October 22–23, 2020*. Astrakhan: Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. p. 281–284. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44609810> (accessed 24th January 2022). (In Russ.).
5. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 1. International and domestic experience of monitoring application. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2014; 1(1): 01TS114. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/01TS114>.
6. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2014; 1(2): 01TS214. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/01TS214>.
7. Sumitoro S., Matsui Y., Kono M., Okamoto T., Fujii K. Long span bridge health monitoring system in Japan. In: *6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 2001*. Newport Beach, CA, United States: International Society for Optics and Photonics; 2001. p. 517–524. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4337/1/Long-span-bridge-health-monitoring-system-in-Japan/10.1117/12.435628.short?SSO=1> (accessed 12th February 2022). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1117/12.435628>.
8. Shridhar K.P., Salunke P.J., Gore N.G. Structural Health Monitoring and Strengthening of Bridges. *International Journal of Science and Engineering Applications*. 2015; 4(5): 309–313. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7753/IJSEA0405.1015>.
9. Koh H.-M., Chang S.P., Kim S.-K., Kim C.-Y., Kim W.J. Development and application of health monitoring system for bridges in Korea. In: *Proc. First Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2002, Barcelona, 14–17 July, 2002*. Barcelona: IABMAS; 2002.

10. Kazaryan V.Yu., Sakharova I.D. Widening and Reinforcement of Pillars During the Modernization of Bridgeworks. *Transport construction*. 2017; (8): 4–7. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30025667> (accessed 12th February 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Ryabuhin A.K., Bovtik E.R., Sokolova S.A. The Problem of Seismic Safety of Reconstructed Industrial Buildings. In: [Actual issues of construction: structures, technologies, economics: Collection of articles based on the materials of the conference of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, Krasnodar, February 17, 2021]. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; 2021. p. 80–83. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48022434&pff=1> (accessed 12th February 2022). (In Russ.).
12. Yagofarov Kh.M., Yagofarov A.Kh., Razumov A.V. [Reconstruction of the span structure of the bridge according to the cantilever-beam scheme]. *Science and security*. 2011; (1): 41–44. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23028286> (accessed 12th February 2022). (In Russ.).
13. Pismak A.V. Reconstruction Difficulties of Reinforced Concrete Bridges with Beam and Continuous Truss Systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013; (4): 55–60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21165709> (accessed 12th February 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Fedotov M.Yu., Loskutov M.L., Shelemba I.S., Kolesnikov A.V., Ovchinnikov I.G. To the issue of monitoring of metal-bearing bridges supporting fiber optic sensors. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(3): 11SATS318. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/11SATS318>.
15. Stasishina A.N., Abumahadi M. Some Rational Method of of Reconstruction of Foundations. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2016;(2): 91–96. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26178646> (accessed 12th February 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Vladimir S. Afanasev — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: a89162825980@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2080-5490>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=916780

Aleksey I. Harchenko — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Moscow, Russia, e-mail: iharchenko@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3850-4285>

Danil R. Idiatulin — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail:
idiatulindanil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3872-543X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1047894

Aidar R. Minmullin — Mosinzhproekt, Moscow, Russia, e-mail: kazan-aidar@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5453-2449>

Regina A. Shaykhutdinova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: Regina22121995@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6967-6055>

Submitted: 15th March 2022. Revised: 14th April 2022. Published online: 27th April 2022.