Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://t-s.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/04SATS419.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS419 (<http://dx.doi.org/10.15862/04SATS419>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кудрявцев С.А., Вальцева Т.Ю., Шемякин В.Ю., Бугунова Ю.А., Котенко Ж.И. Исследование напряженно-деформированного состояния усиленного геосинтетическими материалами илистого основания буронабивного фундамента моста // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/04SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04SATS419

For citation:

Kudryavtsev S.A., Valtseva T.Yu., Shemyakin V.Yu., Bugunova Yu.A., Kotenko Zh.I. (2019). Study of the stress-strain state of reinforced geosynthetic material or the foundation of the bored foundation of the bridge. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/04SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/04SATS419

УДК 72

Кудрявцев Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Проректор по научной работе
Доктор технических наук, доцент
E-mail: olgakudr56@mail.ru

Вальцева Татьяна Юрьевна

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: vtu25@mail.ru

Шемякин Вячеслав Юрьевич

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Аспирант
E-mail: shemv123@mail.ru

Бугунова Юлия Александровна

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Аспирант
E-mail: bugulal35@mail.ru

Котенко Жанна Ивановна

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Заместитель начальника управления аспирантуры, докторантуры и подготовки научных кадров
E-mail: mvt@festu.khv.ru

**Исследование напряженно-деформированного
состояния усиленного геосинтетическими материалами
илистого основания буронабивного фундамента моста**

Аннотация. Строительство объектов в северных регионах Дальнего Востока всегда имеет высокую степень рисков, связанных с сезоннопромерзающими и вечномёрзлыми

грунтами. Особенно это относится к линейным транспортным объектам, требующим повышенного уровня надёжности и ответственности.

Подобные сооружения должны обеспечивать допускаемую деформативность и несущую способность оснований при воздействии перспективных подвижных нагрузок в сложных геологических и природно-климатических условиях.

В статье рассмотрено исследование оснований буронабивных фундаментов мостов с использованием методов математического моделирования и геосинтетических материалов. В исследовании использованы стандартные и численные методы расчетов для определения рациональных параметров элементов конструкций и степени их эксплуатационной надежности и долговечности. При определении поведения конструкций в целом при совместном взаимодействии их отдельных элементов друг с другом использовались нелинейные модели грунтов основания сооружений. Численное моделирование буронабивных фундаментов в упругопластической грунтовой массе позволило разработать эффективные конструктивные решения для снижения деформируемости моста и повышения несущей способности свайного фундамента за счет усиливающих мероприятий при возведении ростверка и создании рациональных параметров структуры в целом.

Одним из рациональных решений основных вопросов, связанных со строительством объектов в регионах со сложными геологическими и природно-климатическим условиями, является научно и технически обоснованное использование свойств современных геосинтетических материалов. Такие материалы способны обеспечивать долговременную устойчивую работу сооружений при применении местных строительных материалов. При этом свойства применяемых геосинтетических материалов должны полностью соответствовать требованиям условий их работы в сооружениях, а также условию долговечности и качества.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; фундамент; геосинтетические материалы; численное моделирование; сваи; упругопластическая модель; слабое основание

Введение

Мост через реку длиной 47,34 м на автомобильной дороге в Сахалинской области России. Мост расположен на прямом участке дороги, пересекающей заболоченную долину. Пролетное строение балочное разрезное длиной 42,0 м цельнометаллическое со стальной ортотропной плитой проезжей части и служебными проходами на металлических консолях. Деформационный шов с резиновым компенсатором.

Фундаменты выполнены с применением буронабивных столбов диаметром 1020 мм с не извлекаемыми обсадными трубами с толщиной стенок 12 мм. Столбы расположены в два ряда по 6 штук в каждом ряду и объединены поверху железобетонными монолитными плитами толщиной до 1,0 м. Расстояние между осями столбов вдоль оси моста 2,70 м, поперек – 2,10 м. Длина столбов опоры №1 равна 22,5 м, опоры №2 – 13,5 м.

На опоре №1 (правобережной) установлены неподвижные тангенциальные опорные части, на опоре №2 (левобережной) применены подвижные тангенциальные опорные части. Для удержания опорных узлов от подбрасывания при землетрясениях пролетное строение соединено с подферменными плитами антисейсмическими устройствами анкерного типа.

В ходе строительства в проект внесены некоторые дополнения. В частности, произведено усиление опоры №2 дополнительным рядом из пяти буронабивных столбов диаметром 1220 мм при длине 18,5 м в не извлекаемых обсадных трубах. Столбы усиления включены в совместную работу с ранее сооруженной частью опоры №2 за счет устройства

общей подферменной плиты. Одновременно на расстоянии 5 м от дополнительно ряда столбов в сторону от русла сооружен отдельный свайный ростверк из расположенных в один ряд четырех буронабивных столбов диаметром 1220 мм в не извлекаемых обсадных трубах с толщиной стенок 18 мм. Плита ростверка имеет размеры 3,2х9,5х1,5 м опущена ниже плиты ростверка опоры №2 на 1,0 м. Упомянутая конструкция предназначена для уменьшения оползневого давления слабых грунтов на опору №2.

1. Инженерно-геологические условия основания

Илы – структурно-неустойчивые грунты, обладающие специфическими свойствами. Структура илистых грунтов определяется как условиями отложения, так и свойствами минерально-коллоидных частиц и составом водной среды. Особенности структуры приводят к тому, что влажность природных илов, как правило, превышает предел их текучести в перемятом состоянии, а коэффициент пористости часто намного больше единицы (пористость не соответствует природному давлению). Структурные связи между частицами и малая водо-проницаемость препятствует гравитационному уплотнению грунтов [1].

Илы подвержены тиксотропным явлениям, возникающим при динамических воздействиях. При этом отмечается возникновение водных пленок вокруг частиц, что значительно снижает сопротивляемость сдвигу. Одновременно при переходе илов в пластичные глины может наблюдаться гравитационное уплотнение, которое вызывает частичное нарушение первоначальной коагуляционной структуры, уменьшение пористости, повышение прочностных показателей и возрастание концентрации порового раствора [2].

Существенным процессом, возникающим в илистых грунтах при действии на них внешней нагрузки, является разрушение структурно-коллоидных связей с одновременным возникновением новых связей вследствие сближения минеральных частиц при уплотнении под нагрузкой. Если величина внешней нагрузки не превышает критическую, то илы можно рассматривать как грунты, обладающие только сцеплением. При давлении, превышающем структурную прочность, сцепление резко уменьшается, илы переходят в разжиженное состояние легко выдавливаясь из-под сооружений [3; 4].

Для правильного учета свойств илов при проектировании необходимо выполнение специальных лабораторных исследований, а наиболее важным является полевые испытания илов без нарушения их структуры штамповыми методами.

2. Фактическое состояния конструкции опор моста

Исходя из приведенной выше информации об илах можно сделать следующие выводы. Устройство буронабивных свай опор моста привело к возникновению вокруг буронабивных фундаментов зон у ила с пониженными прочностными характеристиками и повышенной влажностью, вследствие тиксотропных явлений, связанных с производством работ (динамического воздействия). На устойчивость фундаментов опор этот факт не отразился в виду того, что они заглублены в коренные породы на достаточную глубину.

Дальнейшее строительство подходов насыпи способствовало увеличению вертикальных напряжений и как следствие увеличению горизонтального давления на опору. Расстояние между рядами свай и наличие второго ряда в ростверке опоры предопределило образование арочного эффекта, препятствующего продавливанию ила между сваями. Кроме того, вероятно предположить, что особенность илов – невысокая пористость – в зоне между сваями при динамических воздействиях привела к уплотнению частиц, что в последующем проявилось на поверхности в виде образования полостей под ростверком.

Последующее устройство дополнительного ряда свай в непосредственной близости к опоре не привело к стабилизации грунта, поскольку также спровоцировало структурную неустойчивость илов вокруг свай. Очевидно, тиксотропные явления не позволили включиться в работу дополнительному ряду свай, т. е. грунт продавливаясь между этими сваями оказывал давление на уже упрочнившийся и уплотнившийся к тому времени массив свай опоры-грунт.

3. Конструкция стабилизации опоры №2

Конструкция стабилизации грунтового основания состоит из нескольких частей:

1. В основание котлована, у подножия свайной удерживающей конструкции, погружаются глыбы крупнообломочного несортированного грунта размером до 1–1,5 м.
2. После возведения армогрунтовой конструкции до уровня ростверка свайной удерживающей конструкции, для перераспределения напряжений от веса насыпи и передачи нагрузки через сваи на прочные коренные грунты устраивается платформа распределения напряжений [5; 6].
3. Армирование геосинтетическими материалами насыпи выполняется методом обертывания (рис. 1).

Рисунок 1. Схема обертывания (разработано автором)

Общий вид армогрунтовой конструкции усиления подходной насыпи представлен на рисунке 2.

Рисунок 2. Общий вид армогрунтовой конструкции усиления подходной насыпи (разработано автором)

На рисунке 3 показан фасад армогрунтовой конструкции. Конструкция, расположенная ниже уровня дневной поверхности, устраивается с нахлестом рулонов на 0,5 м [7–9]. Расположенная выше – без нахлестов.

Рисунок 3. Фасад армогрунтовой конструкции (разработано автором)

4. Геотехническое моделирование работы конструкций стабилизации опор моста

Геотехническое моделирование вариантов конструкций стабилизации опор моста выполнено для подтверждения рациональности инженерных решений с использованием программного комплекса «FEM models», разработанного геотехниками НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект» Санкт-Петербурга под руководством профессора В.М. Улицкого.

Программный комплекс позволяет решать трехмерные теплофизические и напряженно-деформированного состояния задачи для сооружений и их оснований размерностью в несколько миллионов степеней свободы в приемлемое время на персональном компьютере. В этом отношении комплекс не имеет ни отечественных, ни европейских аналогов [10].

Исходя из изложенных фактов, влияющих на НДС слабых оснований, наиболее достоверную картину можно получить при использовании в расчетах дискретных моделей, в частности МКЭ в упругопластической постановке.

Для описания работы конструкций применялась упругопластическая модель с предельной поверхностью. Выбор этой модели обуславливается тем, что ее параметры могут быть взяты из имеющихся материалов стандартных инженерно-геологических изысканий. В такой постановке численные расчеты хорошо согласуются с традиционными инженерными методами расчета деформаций и позволяют с достаточной точностью описать напряжённое состояние и деформирование сооружений [11].

Блок решения задач позволяет решать системы линейных уравнений, а также производить (при необходимости) итерационное решение нелинейных задач. Для решения систем линейных алгебраических уравнений могут использоваться прямые методы (метод Гаусса, метод Холецкого), а также итерационные методы. Для решения больших систем линейных алгебраических уравнений в программе разработан оригинальный итерационный метод, основанный на методе сопряженных градиентов с использованием специального предобуславливателя, гарантирующего улучшение обусловленности матрицы решения и ускоряющего получения решения итерационным методом [12]. Итерационный метод решения позволяет достигнуть заданной пользователем точности решения. Как правило, вычисления выполняются с точностью результата 10^{-8} .

Предлагаемая методика численного моделирования работы армогрунтовой конструкции и основания, усиленных геоматериалами, является составной частью модульной программы FEM Models. Рассматриваемый вариант программы реализует упругопластическое решение МКЭ с использованием процедуры «начальных напряжений». Выбор интерполирующих полиномов и построение матрицы жесткости конечного элемента, а также составление и решение системы алгебраических уравнений относительно узловых значений основывается на программном комплексе «FEM models» [13]. При разработке грунтовой модели авторами были приняты следующие основные допущения:

- грунт рассматривается как идеально-упругопластическая среда с критерием прочности Кулона, подчиняющаяся законам пластического течения;
- реакция среды на объемные деформации упругая, а на сдвигающие – упругопластическая с равнообъемным течением;
- интерполирующие полиномы для каждого конечного элемента приняты линейными, а напряжения и деформации в нем – постоянны;
- природное напряженное состояние заменяется гидростатическим тензором обжатия «характерного объема» грунта;
- существует завершенность фильтрационной консолидации и реологических процессов в основании.

Полные деформации грунтовой среды представлены в виде суммы упругих $d\varepsilon_{ij}^e$ и пластических $d\varepsilon_{ij}^p$ деформаций

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

Для определения $d\varepsilon_{ij}$ используется теория пластического течения в форме неассоциированного закона:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad F \neq f \quad (2)$$

где $d\lambda$ – малый скалярный множитель; F – пластический потенциал; σ_{ij} – компоненты напряжений; f – критерий предельного состояния.

При переходе из упругого состояния в пластическое вектор $\partial \bar{\sigma}_{ij}$ – проходит через плоскость, касательную к поверхности предельного состояния, а конец вектора напряжения движется по этой поверхности. В данном случае нагружение будет нейтральным, при котором законы пластичности и упругости совпадают (возникают только упругие деформации), что является условием непрерывности.

При решении упругопластической задачи (плоская деформация) используется схема идеально-пластической среды с критерием прочности Кулона

$$f = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} + (\sigma_x + \sigma_y) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

где σ_x ; σ_y ; τ_{xy} – осевые напряжения; φ – угол внутреннего трения; c – удельное сцепление.

Для рассматриваемой среды основные параметры границы предельной поверхности c, φ постоянны и не зависят от накопленной пластической деформации. При достижении предельной поверхности f происходит равнообъемное течение и пластический потенциал F параллелен гидростатической оси. При выходе за критерий предельного состояния на каждом цикле итерации поверхность текучести совпадает с поверхностью начала пластичности, таким образом, приращение пластических деформаций происходит в результате нейтрального нагружения.

Геотехническое моделирование проходило в два этапа: первый – моделирование сложившейся ситуации, когда разгрузка насыпи способствует стабилизации деформаций, второй – для определения напряженно-деформированного состояния конструкции стабилизации [14].

Свайная удерживающая конструкция при моделировании не учитывалась в виду того, что ее деформации зафиксированы не были и предположительно из-за перехода ила вокруг свай в текучее состояние грунт продавливается между свай. Наличие этой конструкции и ее работа приняты в запас.

Расчетная схема основания фундаментов опоры моста представлена на рис. 4. На этом шаге система находится в стабильном состоянии, деформации опоры отсутствуют. Моделируемая ситуация соответствует текущему состоянию опоры, когда часть насыпи разобрана.

Рисунок 4. Расчетная схема основания фундаментов опоры моста (разработано автором)

Следующие шаги заключались в последовательном моделировании возведения подходной насыпи с отсыпкой грунта тела подходной насыпи в сторону расположения моста. На рисунке 5 приведены зоны развития пластических деформаций и горизонтальные перемещения, на момент полного возведения насыпи. Величина горизонтальных деформаций достигает величины 110 мм.

Рисунок 5. Зоны пластических деформаций и горизонтальные перемещения (м) на этапе полной отсыпки грунта насыпи (разработано автором)

Как видно на рисунке 8 пластические деформации развиты на всю мощность ила и частично в подстилающем его суглинке. Характер развития зон в суглинке подтверждает

предположение о применении в этом случае теории давления грунта на ограждающие конструкции. Образованный в суглинке сдвигающийся грунтовый клин расположен в слое ила и грунтах тела насыпи. Горизонтальные перемещения опоры составили более 10 см.

На рисунке 6 приводится эпюра горизонтального давления грунта на поверхность сваи фундамента. Максимальные величины горизонтальных напряжений под подошвой ростверка буронабивных фундаментов достигают значений до 450 кПа.

Рисунок 6. Эпюра горизонтальных напряжений без конструктивных мероприятий, кПа (разработано автором)

Результаты моделирования конструкции стабилизации грунтового основания буронабивных фундаментов представлены на рисунке 7. Максимальные величины горизонтальных деформаций составляют до 25 мм, т. е. в 4 раза произошло снижение горизонтальных деформаций.

Рисунок 7. Зоны пластических деформаций и величины горизонтальных деформаций перемещения конструкции (мм) (разработано автором)

Эпюра горизонтального давления показана на рисунке 8. Максимальные величины горизонтальных напряжений под подошвой ростверка буронабивных фундаментов достигают значений до 225 кПа, т. е. в 2 раза произошло снижение горизонтальных напряжений.

Рисунок 8. Эпюра горизонтальных напряжений по длине сваи с устройством конструктивных мероприятий, кПа (разработано автором)

Выводы

1. Конструкция стабилизации грунтового основания буронабивных фундаментов состоит из свайной армогрунтовой конструкции до уровня ростверка и армирования тела подложной насыпи геосинтетическими материалами методом обертывания.
2. Геотехническое моделирование вариантов конструкций стабилизации опор моста выполнено для подтверждения рациональности инженерных решений с использованием программного комплекса «FEM models».
3. Армогрунтовая конструкция грунтового основания буронабивных фундаментов, позволяет снизить горизонтальные напряжения, от собственного веса грунта тела насыпи по горизонтальным напряжениям в два раза, а по горизонтальным деформациям в четыре раза. Это указывает на эффективность работы конструкции стабилизации.
4. Сравнительный анализ результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунта вблизи свайного фундамента опоры моста показывает на значительное снижение зон пластических деформаций в грунтовом основании. Это говорит о том, что касательные напряжения не превышают предельных величин прочностных характеристик грунта.
5. Треугольный вид армогрунтовой конструкции создает дополнительное преимущество: при нагружении (отсыпка насыпи) вертикальная нагрузка будет создавать боковое расширение грунта, а за счет клинообразной формы перемещение грунта будет направлено в сторону от опоры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Technological reliability of building of geotechnical structures / Kudruavtsev S.A., Shepitko T.V., Lutsky S., Zabolotny S., Kovshun V.S. // MATEC Web of Conferences. 2019. V. 265. 07001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926507001>.
2. Kudruavtsev S.A., Shestakov I.V., Kazharsky A.V. Monitoring and protection of the foundations of buildings of dangerous production plants on seasonally heaving ground // Proceeding of the 8th Asian young geotechnical engineers conference, Astana, Kazakhstan. 2016. P. 191–196.
3. Paramonov V., Sakharov I., Kudriavtcev S. Forecast the processes of thawing of permafrost soils under the building with the large heat emission // MATEC Web of Conferences. 2016. P. 05007.
4. Kudriavtcev S., Paramonov V., Sakharov I. Strengthening thawed permafrost base railway embankments cutting berms // MATEC Web of Conferences. 2016. P. 050002.
5. Developing design variants while strengthening roadbed with geomaterials and scrap tires on weak soils / Arshinskaya L.A., Kudryavtsev S.A., Valtseva T.U., Berestyanyy U.B., Zhusupbekov A. // Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, IW-TDGM 2007 International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, IW-TDGM 2007. 2008. P. 171–178.

6. Berestianyi I., Goncharova E., Kudriavtcev S. Engineering and construction of geotechnical structures with geotechnical materials in coastal Arctic zone of Russia // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. "Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE 2013". 2013. P. 562–566.
7. Valtseva T.Y., Kudruavtsev S.A. The use of geosynthetic materials in special engineering geological conditions of the Far East // Proceeding 11th ICG – International Conference on Geosynthetics, 16–21 September. – Seoul, Korea. 2018. P. 321–326.
8. Geosynthetical materials in designs of highways in cold regions of Far East. / Berestyanyy Y.B., Kudryavtsev S.A., Valtseva T.Y., Goncharova E.D., Mikhailin R.G. // Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. "Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction". 2009. P. 546.
9. Mihailin R. Motorway structures reinforced with geosynthetic materials in polar regions of Russia / Kudriavtcev S., Berestianyi I., Goncharova E., Valtseva T. // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. "Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE Busan". 2014. P. 1141–1143.
10. Кудрявцев С.А. Численные исследования теплофизических процессов в сезонно-мерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2003. Т. XIX. № 4. С. 102.
11. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
12. Берестяный Ю.Б., Вальцева Т.Ю., Кудрявцев С.А. Усиление пути для пропуска тяжеловесных поездов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 1. С. 27–29.
13. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
14. Пупатенко В.В., Кудрявцев С.А., Данильянц Е.С. Деформационный критерий и эксплуатационный потенциал // Мир транспорта. 2008. Т. 6. № 2 (22). С. 136–142.

Kudryavtsev Sergey Anatolevich

Far Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: olgakudr56@mail.ru

Valtseva Tatiana Yurevna

Far Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: vtu25@mail.ru

Shemyakin Vyacheslav Yurevich

Far Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: shemv123@mail.ru

Bugunova Yuliya Aleksandrovna

Far Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: bugulal35@mail.ru

Kotenko Zhanna Ivanovna

Far Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: mvt@festu.khv.ru

Study of the stress-strain state of reinforced geosynthetic material or the foundation of the bored foundation of the bridge

Abstract. The building of constructions in northern regions of the Far East is always connected with a high degree of seasonal freezing risk. This especially refers to a line transport structures which require a high level of reliability and responsibility. Such structures should provide permissible deformability and bearing capacity of the bases when exposed to promising moving loads in difficult geological and climatic conditions.

The article discusses the study of the foundations of bored foundations of bridges using methods of mathematical modeling and geosynthetic materials. The study used standard and numerical calculation methods to determine the rational parameters of structural elements and the degree of their operational reliability and durability. In determining the behavior of structures as a whole with the joint interaction of their individual elements with each other, nonlinear models of the soil of the base of the structures were used. Numerical modeling of bored foundations in an elasto-plastic soil mass allowed us to develop effective structural solutions to reduce the deformability of the bridge and increase the bearing capacity of the pile foundation due to reinforcing measures during the construction of the grillage and the creation of rational parameters of the structure as a whole.

One of the rational solutions for the main issues which is connected with a construction of facilities in the areas with complex geological and climatic conditions is reasonable usage of modern geosynthetic material properties. Such materials are capable of providing long-term stable operation of facilities made of local building materials. So, the properties of such geosynthetics materials must fully comply with the demands of conditions of their work in the structures and provide a long lifespan as well as high quality.

Keywords: stress-strain state; foundation; geosynthetic materials; numerical modeling; piles; elastoplastic model; weak base

REFERENCES

1. Kudruavtsev S.A., Shepitko T.V., Lutsky S., Zabolotny S., Kovshun V.S. (2019). Technological reliability of building of geotechnical structures. *MATEC Web of Conferences*. 2019. (265), p. 07001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926507001>.
2. Kudruavtsev S.A., Shestakov I.V., Kazharsky A.V. (2016). *Monitoring and protection of the foundations of buildings of dangerous production plants on seasonally heaving ground*. Astana, Kazakhstan, pp. 191–196.
3. Paramonov V., Sakharov I., Kudriavtcev S. (2016). Forecast the processes of thawing of permafrost soils under the building with the large heat emission. *MATEC Web of Conferences*, p. 05007.
4. Kudriavtcev S., Paramonov V., Sakharov I. (2016). Strengthening thawed permafrost base railway embankments cutting berms. *MATEC Web of Conferences*, p. 050002.
5. Arshinskaya L.A., Kudryavtsev S.A., Valtseva T.U., Berestyanyy U.B., Zhusupbekov A. (2008). *Developing design variants while strengthening roadbed with geomaterials and scrap tires on weak soils*. Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, IW-TDGM 2007 International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, IW-TDGM 2007, pp. 171–178.
6. Berestianyi I., Goncharova E., Kudriavtcev S. (2013). *Engineering and construction of geotechnical structures with geotechnical materials in coastal Arctic zone of Russia*. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. "Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE 2013", pp. 562–566.
7. Valtseva T.Y., Kudruavtsev S.A. (2018). *The use of geosynthetic materials in special engineering geological conditions of the Far East*. Seoul, Korea, pp. 321–326.
8. Berestyanyy Y.B., Kudryavtsev S.A., Valtseva T.Y., Goncharova E.D., Mikhailin R.G. (2009). *Geosynthetic materials in designs of highways in cold regions of Far East*. Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. "Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction", p. 546.
9. Mihailin R., Kudriavtcev S., Berestianyi I., Goncharova E., Valtseva T. (2014). *Motorway structures reinforced with geosynthetic materials in polar regions of Russia*. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. "Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE Busan", pp. 1141–1143.
10. Kudryavtsev S.A. (2003). Numerical studies of thermophysical processes in seasonally frozen soils. *Earth's Cryosphere*, 4(IIX), p. 102 (in Russian).
11. Kudryavtsev S.A. (2004). Calculation of the process of freezing and thawing according to the Thermoground program. *Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 4, p. 83 (in Russian).
12. Berestyanyy Yu.B., Val'tseva T.Yu., Kudryavtsev S.A. (2008). Strengthening the track for passing heavy trains. *Track and track facilities*, 1, pp. 27–29 (in Russian).
13. Kudryavtsev S.A. (2004). Calculation of the process of freezing and thawing according to the Termoground program. *Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 4, p. 83 (in Russian).
14. Pupatenko V.V., Kudryavtsev S.A., Danil'yants E.S. (2008). Deformation criterion and operational potential. *World of Transport*, 2(6), pp. 136–142 (in Russian).