

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/03SATS222.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS222 (<https://doi.org/10.15862/03SATS222>)

Организационно-технологические решения при усилении земляного полотна в криолитозоне

Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Зайцев А.А.

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

Автор, ответственный за переписку: Артюшенко Игорь Александрович, e-mail: tywka351@mail.ru

Аннотация. Возведение транспортных сооружений в районах Арктической зоны Российской Федерации является сложной инженерной задачей. Данная сложность обуславливается не только грамотным выбором конструктивно-технологических решений по улучшению грунтов основания, но и рациональными организационно-технологическими решениями, которые в свою очередь влияют на сроки возведения транспортных сооружений, их стоимость и эффективность строительства в районах крайнего Севера Российской Федерации. При строительстве в криолитозоне зачастую строительные материалы требуют доставки к территории строительства с помощью железнодорожного, автомобильного и водного транспорта.

Строительство в сложных климатических условиях подразумевает использование новых технологий производства работ с использованием современного оборудования для обеспечения надежности и долговечности строящихся сооружений. Грамотная организация работ и современные технологии максимально сокращают срок производства работ, но при этом увеличивают затраты на строительство.

Для сокращения времени производства работ в статье представлена технология усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня.

Авторами представлен состав работ по усилению грунтов основания вертикальными столбами из щебня при возведении насыпей по II принципу проектирования (с допущением оттаивания), технологическая последовательность их выполнения. Разработан план производства работ по реализации двухлучевой организационной схемы по усилению грунтового основания вертикальными столбами из щебня на участке Обская-Салехард, пикет 01+50-пикет 06+50 новой железнодорожной линии «Северный широтный ход».

Показаны потребности в машинах и механизмах, используемых в реализации предложенной технологии. Даны рекомендации по наиболее благоприятному периоду производства работ.

Ключевые слова: транспорт; криолитозона; земляное полотно; организация строительства; многолетнемерзлые грунты

Organizational and technological solutions for strengthening the earth roadbed in the permafrost zone

Taisia V. Shepitko, Igor A. Artyushenko, Andrey A. Zaytsev

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Igor A. Artyushenko, e-mail: tywka351@mail.ru

Abstract. The transport facilities construction in the Arctic zone regions of the Russian Federation is a complex engineering task. This complexity is caused not only by a competent choice of structural and technological solutions for improving the foundation soils but also by rational organizational and technological solutions, which in turn affect the timing of the transport facility construction, its cost, and construction efficiency in the regions of the Far North of the Russian Federation. During construction in the permafrost zone, building materials often require delivery to the construction site using rail, road, and water transport.

Construction in difficult climatic conditions implies the use of new work execution technologies using modern equipment to ensure the reliability and durability of structures under construction. Competent work organization and modern technologies minimize the construction time, but at the same time increase construction costs.

To reduce the work time, the article presents the soil basement strengthening technology with the vertical shaft of gravel chippings.

The authors present the work scope on the soil basement strengthening with vertical shafts of gravel chippings during the construction of the embankment according to the II design principle (with the allowance of thawing) and the technological sequence of its implementation. A work execution plan has been developed for the implementation of a double-beam organizational chart for strengthening the soil basement with vertical shafts of gravel chippings at the Obskaya-Salekhard section, picket 01+50-picket 06+50 of the new railway line "Northern latitudinal way".

The needs for machines and mechanisms used in the implementation of the proposed technology are shown. Recommendations are given on the most favorable period for the work execution.

Keywords: transport; permafrost; soil basement; organization of construction; permafrost soils

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

Вертикальные столбы из щебня (название согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», раздел 6.10.30¹) (в некоторых источниках известны как «щебеночные сваи») представляют собой массив столбов из щебня, помещенных с помощью вибрирующего инструмента в грунт под предполагаемым объектом. Этот метод улучшения грунтов оснований также известен как виброзамещение грунтов [1].

В соответствии с технологией использования установки ВС-1, устройство скважин ведут с применением навешенной на кран соответствующей грузоподъемности и длины стрелы. Для выполнения такелажных и монтажных работ используют кран, имеющий соответствующую грузоподъемность и длину стрелы. Схема организации работ установкой ВС-1 представлена на рисунке 1.

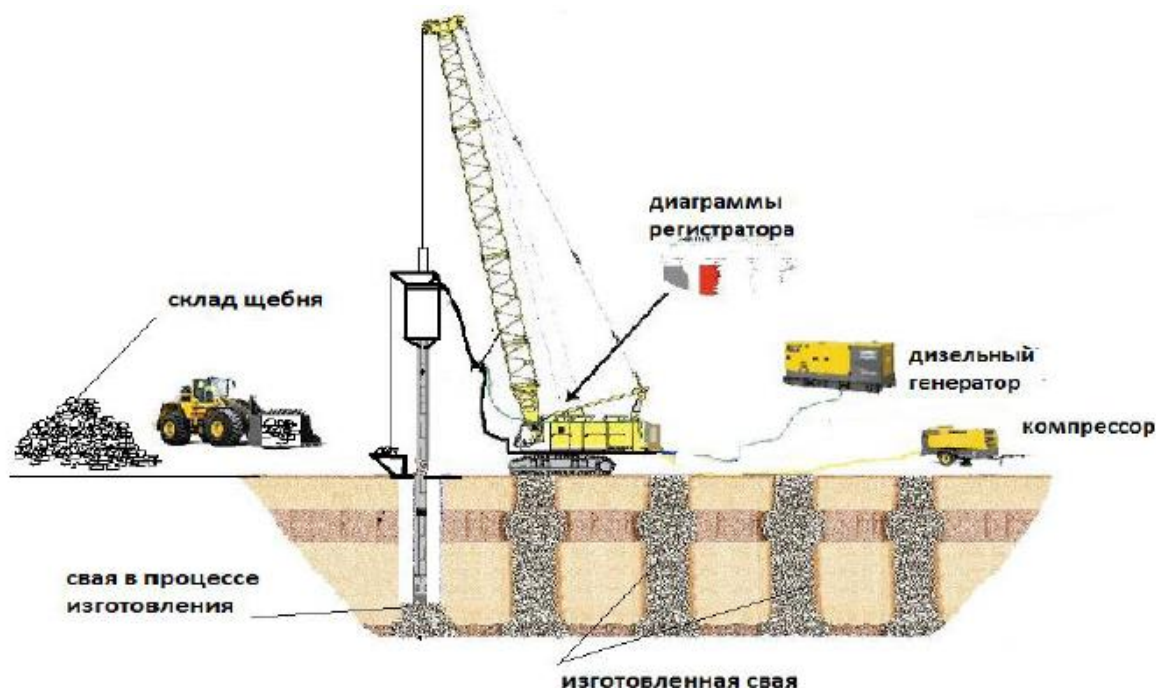


Рисунок 1. Схема организации работ установкой ВС-1 [1]

Figure 1. VS-1 unit lay out [1]

Основанием для прохождения строительной техники при производстве работ служит уплотненный грунт [2]. Планировку рабочей площадки осуществляют бульдозером по нивелировочным отметкам с

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. — М.: институт АО «НИЦ «Строительство», 2017. — 225 с.

уплотнением грунто-пневматическими катками и поливом водой уплотняемого грунта насыпи.

Перед началом устройства скважины под столб его центр закрепляют на местности арматурным стержнем, положение которого определяют геодезисты строительной площадки с пунктов геодезической разбивочной основы по координатам в соответствии с проектным положением [1].

При уплотнении грунтов основания автомобильной и железной дороги вертикальные столбы из щебня сооружаются в шахматном порядке с шагом 1900*2200 мм.

Условный диаметр столба Ø1000 мм (вариации могут быть в соответствии с типом грунта и степенью их уплотнения). Глубина погружения столбов переменная, в соответствии с проектом определяется по геологическим изысканиям на глубину залегания плотных или скальных пород грунта [1].

Устройство скважин выполняют путем погружения обсадной трубы, оснащенной виброуплотнителем типа В27 (Betterground), методом пенетрационно-вибрационного погружения под собственным весом колонны. Как правило, скорость проходки скважины составляет от 1 до 5 м/мин, которая зависит от инженерно-геологических элементов.

Вертикальные столбы из щебня выполняются до достижения уплотненных либо скальных или мерзлых слоев грунта в зависимости от их наличия с заходом в них не более 0,5 м, что должно контролироваться в процессе производства работ [1].

Как показывает опыт строительства, отраженный в проекте производства работ на строительство транспортного перехода через Керченский пролив с усилением основания насыпи и конусов моста щебеночными сваями под автомобильную дорогу, разработанном ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ»², погружение колонны и изготовление вертикальных столбов из щебня заданной длины следует осуществлять с применением компрессорных установок (в защитной, вспомогательной воздушной среде). При этом рабочее давление и расход воздуха при бурении скважин принимается в диапазоне 5–15 бар и 20 м³/мин. Режимные параметры и необходимость применения воды уточняются в процессе изготовления опытных кустов свай.

² Строительство транспортного перехода через Керченский пролив. Участок № 1. Автомобильная дорога. Проект производства работ. Усиление основания насыпи и конусов щебеночными сваями. СГМ/15-32-А1-ППР-УО(к). — Санкт-Петербург, 2016. — 44 с.

Уточнив и проверив разбивку осей скважины, заранее смонтированное оборудование системы ВС-1 устанавливают на точку бурения, определяемую в процессе инструментального геодезического выноса. После наводки и установки стрелы крана со смонтированной установкой ВС-1, выверяют плановое положение колонны.

Склад инертных материалов (щебня) формируют в непосредственной близости от зоны производства работ с запасом материала на трое суток.

В качестве заполнителя при изготовлении вертикальных столбов из щебня рекомендуется применять щебень изверженных пород маркой дробимости М-600, фракции 20–40 мм по ГОСТ 8267-93³. Средний расчетный расход щебня, с учетом коэффициента запаса $K+1,2$ составляет $0,942 \text{ м}^3$ на погонный метр изготавливаемой сваи условным диаметром 1000 мм. Фактический расход инертных материалов определяется при изготовлении столбов на опытных площадках до начала массового производства работ в соответствии с проектом.

Частицы щебня, гравия или строительного боя должны иметь, в основном, округлую, угловую или кубовидную форму, содержание частиц игольчатой формы не должно превышать 35 % по массе. В щебне должны отсутствовать органические материалы или загрязняющие вещества (остатки древесины и растений, химические отходы и т. д.). Содержание частиц пылеватой и глинистой не должно превышать 3 %. Щебень должен хорошо уплотняться и формировать прочную свайную опору, сохраняя при этом дренирующие свойства, соответствовать используемому технологическому оборудованию и свободно перемещаться по системам подачи материала в скважину, без зависания и их блокировки (фракция 20–40). Заполнение скважин при отрицательных температурах воздуха не должно проводиться мерзлым материалом.

Заполнение скважины щебнем ведется по технологии виброуплотнения с нижней подачей щебня, через опущенную до забоя трубу-инъектор снизу-вверх: извлечение трубы с одновременным заполнением и уплотнением послойно укладываемого в скважину щебня и сопряженных вмещающих пород.

Устройство скважины осуществляется на глубину, предусмотренную проектом. В процессе работы используемой установки грунт раздвигается в радиальном направлении от оси скважины и одновременно выносятся потоком воздуха, обеспечивая требуемое погружение и создание пространства для эффективного заполнения

³ ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. — Москва: Стандартинформ, 2018. — 16 с.

щебнем. По достижении снарядом проектной отметки заполненную ведущую трубу колонны приподнимают над забоем на 200–500 мм, освободившееся пространство замещается щебнем, дальнейший обратный ход производится путем перемещения колонны вниз с одновременной подачей инертных материалов в колонну труб до достижения требуемой степени уплотнения грунтов и проектного диаметра сваи.

Подаваемый на забой щебень утрамбовывается во вмещающих породах за счет веса колонны и подачи стрелы крана, вибрационного воздействия на грунт [3].

Вертикальные столбы из щебня могут быть применены как при строительстве железных, автомобильных дорог и мостов, так и при укреплении береговой линии водоемов и намывных территорий [4].

Данная технология увеличивает несущую способность основания, столбы выступают в роли вертикальных дренажей, тем самым предотвращая переувлажнение грунтов основания [5]. Вертикальные столбы из щебня проектируются по всей области, которая будет усилена, в шахматном порядке, либо в виде треугольной или прямоугольной сетки. Рассматриваемая технология используется в Европе с 1950-х годов, а в Соединенных Штатах с 1970-х годов [6].

Технология устройства вертикальных столбов из щебня увеличивает прочностные характеристики массива грунта, вследствие чего значительно увеличивается его несущая способность и устойчивость. Устройство столбов позволяет уменьшить значение деформаций основания от 2 до 6 раз [7–9].

1. Подготовительные работы

1. Preliminary work

Как известно, в подготовительный период производится общая организационно-технологическая подготовка к развертыванию работ основного периода, которая включает техническую, инженерно-производственную подготовку и выполнение работ подготовительного периода. В их состав входит подготовка территории строительства — подрядной организацией должна быть подготовлена и передана рабочая площадка для возможности беспрепятственного и безопасного проезда автотранспорта и буровой техники [10].

Именно в подготовительный период усиливается основание под сооружаемый объект, в частности — устраиваются вертикальные столбы из щебня. До их устройства должна быть подготовлена ровная, уплотненная рабочая площадка. Поверхность рабочей площадки должна

быть сухой, в противном случае она не может быть принята для выполнения работ по усилению грунтов основания. Для обеспечения рабочей площадки в сухом состоянии должны быть устроены водоотводные каналы по периметру площадки с последующим принудительным отводом воды за пределы рабочей площадки. Ее отметка на момент передачи под производство работ составляет +0,500 м.

Габариты рабочей площадки определяются шириной и длиной усиливаемого основания с учетом безопасного размещения строительно-монтажной техники при выполнении работ по сооружению свайного основания. До начала работ по усилению грунтов основания должны быть переданы исполнителю, кроме рабочей площадки, соответствующей приведенным требованиям, предоставляется исполнительная съемка рабочей площадки с нанесением существующих коммуникаций и технические условия на выполнение свайных работ в местах размещения подземных коммуникаций [11].

Подготовительные работы осуществляются до начала производства строительных работ и включают в себя:

- а) Обустройство санитарно-бытовых, временных складских и технических помещений.
- б) Инженерную подготовку территории строительства, в том числе:
 - подготовка площадки для временного складирования материала и инвентаря на рабочую смену;
 - установка предупредительных и указательных надписей и знаков по безопасному ведению работ;
 - опробование машин, механизмов и приспособление, необходимых для производства работ;
 - доставка на площадку и подготовка к работе необходимых приспособлений, инвентаря и инструмента.
- в) Геодезическую разбивку границ площадки и осей скважин, вынесение в натуру центров скважин, согласно рабочей документации. Разбивку основных осей строящегося участка следует выполнять в соответствии с требованиями СП 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве»⁴ [11].

⁴ СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84. — Москва, 2018. — 58 с.

Строительную площадку необходимо обеспечить щебнем, соответствующим требованиям проекта. Работы по сооружению вертикальных столбов из щебня осуществляются в одну смену, согласно графику производства работ.

2. Организация работ по усилению грунтов основания вертикальными столбами из щебня на участке Обская-Салехард, Пикет 01+50 — Пикет 06+50 новой железнодорожной линии «Северный широтный ход»

2. Organization of work to strengthen the soil basement with vertical shafts of gravel chippings at the Obskaya-Salekhard section, Picket 01+50 — Picket 06+50 of the new railway line "Northern latitudinal way"

По результатам теплофизических расчетов, выполненных в статье [12], получено наиболее благоприятное для эффективного производства работ и последующей эксплуатации время (август, сентябрь и октябрь). Данный временной интервал благоприятен как для ведения работ (температура воздуха и температура грунта), так и для дальнейшей эксплуатации сооружения. Кроме того, в холодное время года смерзаются инертные материалы, что, недопустимо для качественного сооружения вертикальных столбов из щебня.

На основе опыта компании «Геоизол» по усилению основания вертикальными столбами из щебня в статье разработаны графики производства работ, определена потребность в машинах и механизмах для изучаемого участка.

Согласно МДС 12-29 «Методические рекомендации по оформлению технологической карты»⁵ нормы времени рабочих и машин могут быть разработаны организацией, имеющей соответствующую лицензию, либо приняты на основе опыта строительства объектов-аналогов.

При организации работ использован опыт компании «Геоизол» по усилению грунтов основания насыпи, сложенного слабыми заторфованными грунтами, на следующих объектах: участке скоростной автомобильной дороги Москва-Санкт-Петербург — М11; на территории Крестовского острова в Финском заливе при усилении слабых глинистых грунтов при создании искусственного (насыпного) участка; на объекте «Строительство автомобильной дороги А-121 «Сортавала» при устройстве

⁵ МДС 12-29.2006. Методические рекомендации по разработке и оформлению технологической карты / ЦНИИОМТП. — М.: ФГУП ЦПП, 2007. — 12 с.

опытной площади в условиях залегания с поверхности заторфованных грунтов на глубину до 7 м; строительство транспортного перехода через Керченский пролив (усиление подходов насыпей щебеночными сваями).

В таблице 1 представлена потребность в основных машинах и механизмах, требующихся при усилении земляного полотна вертикальными столбами из щебня.

Таблица 1 / Table 1

Потребность в основных машинах и механизмах
Need for basic machines and mechanisms

№ п/п	Наименование Name	Марка Brand	Ед. изм. Units	Количество Quantity
1	Кран гусеничный (г/п ≥ 70 т) Crawler crane (load-carrying ability ≥ 70 t)	Liebherr LR 1100	шт.	2
2	Фронтальный погрузчик Frontload truck	JCB	шт.	2
3	Бульдозер Bulldozer	Caterpillar	шт.	2
4	Автосамосвал Dumping truck	KAMAZ 6520	шт.	2
5	Установка ВС-1 в сборе VS-1 unit assembled	Betterground	шт.	2
6	Дизельная электростанция Diesel power block	250 кВт	шт.	2
7	Компрессор дизельный Diesel-driven air-compressor	AtlasCopcoXSA186	шт.	2

Для снижения сроков строительства, что особенно актуально для строительства транспортных объектов в Арктической зоне, предложена двухлучевая организационная схема (рис. 2). Ее реализация приведет к росту затрат, что в данном случае оправдано.

Разработка щебня осуществляется в ближайшем по расположению карьере. Доставка к месту складирования инертного материала осуществляется автосамосвалами, грузоподъемность и марку которых принимают согласно проектной документации. Вблизи от места производства работ формируют склад щебня. Запас щебня на складе должен быть в необходимом количестве (количество рассчитывается на 3 рабочих дня).

После подготовки и проверки оборудования навстречу друг другу кранами Liebherr LR 1100 с навесным оборудованием ВС-1 и с вспомогательными экскаваторами-погрузчиками JCB производится усиление грунтового основания вертикальными столбами из щебня. После удаления места производства от склада инертных материалов, их транспортировка осуществляется автосамосвалами.

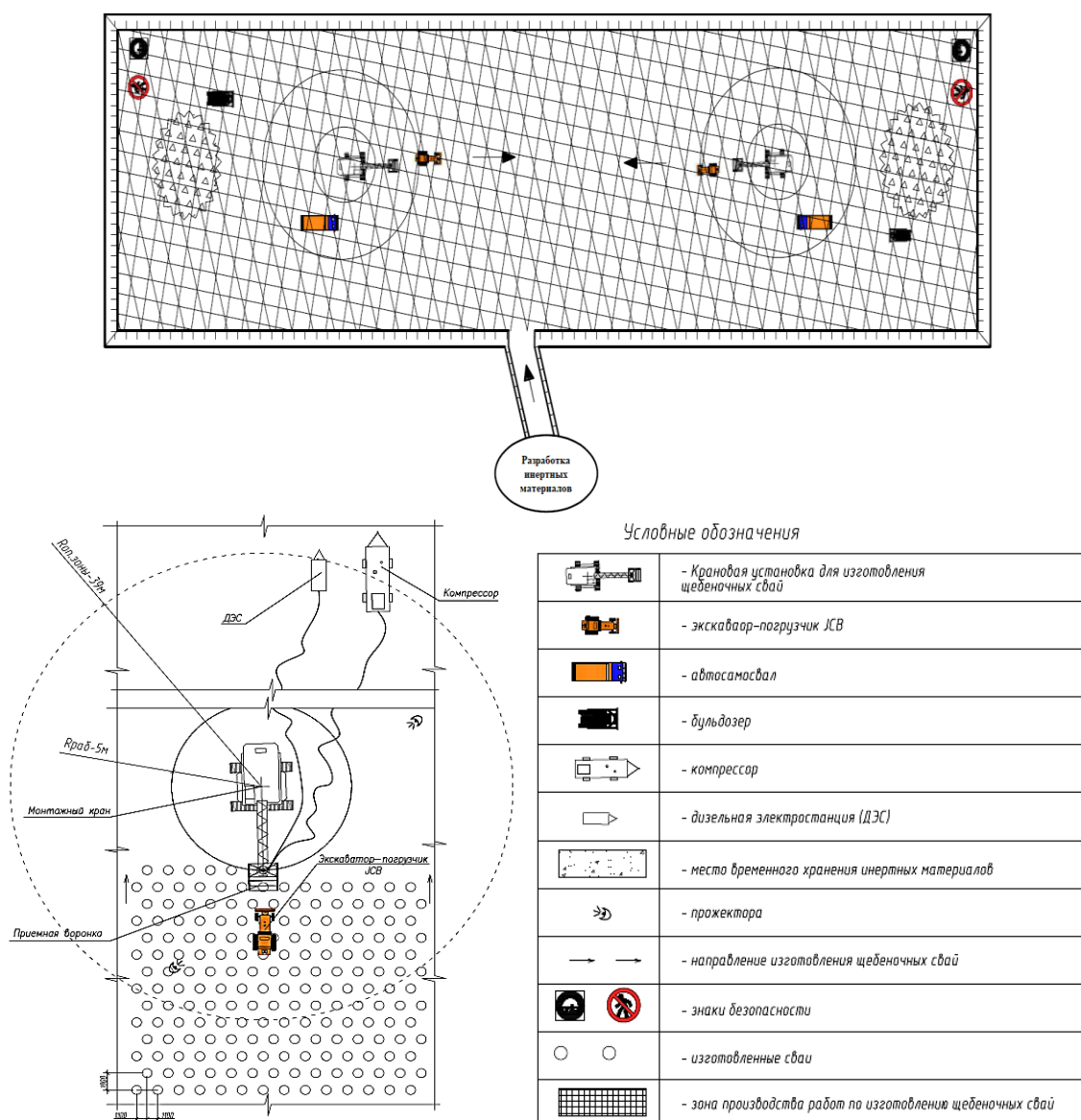


Рисунок 2. План производства работ по усилению земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами (разработано авторами)

Figure 2. Work execution plan to strengthen the earth roadbed with vertical shafts of gravel chippings in areas with permafrost soils (developed by the authors)

3. Контроль качества и мониторинг процесса сооружения и состояния вертикальных столбов из щебня

3. Construction process quality control and monitoring and the condition shafts from gravel chippings

С целью предупреждения возникновения деформаций и своевременного принятия мер при их возникновении должен быть

организован регулярный мониторинг строящихся объектов на всех этапах их жизненного цикла [13].

Технологический мониторинг выполняется в период эксплуатации объекта строительства. Основная функция состоит в необходимости обеспечить направленное технологическое регулирование производственных операций [14].

При производстве работ по усилению грунтового основания вертикальными столбами из щебня одним из элементов мониторинга является бортовая компьютерная техника, с помощью которой ведется оперативный контроль качества производства работ. Регистрируются глубина бурения, сила тока, давление воздуха, отклонение свай по вертикали, дата, время, объем подаваемого в скважину материала (щебня). Полученные данные позволяют судить о качестве выполнения работ, по их результатам формируется паспорт каждого столба с указанием контрольных параметров и профиля.

С целью определения качества уплотнения основания могут выполняться натурные испытания фрагмента усиленного основания статической нагрузкой, методом статического зондирования, одометрические испытания, испытания крыльчаткой и др. [15].

Это устройство может выступать в качестве пульта дистанционного управления для регулирования давления или потока воды, воздуха, цементного раствора. Эти параметры регулируются программным комплексом в зависимости от глубины [15]. Регистратор качества — это сенсорный экран, расположенный в кабине оператора — рисунок 3.



Рисунок 3. Регистратор контроля качества возводимого вертикального столба⁶

Figure 3. Quality control recorder of the erected vertical shafts

⁶ Betterground quality monitoring and control system [Электронный ресурс]: Betterground Inc. — URL: <https://www.betterground.com/en/quality-control> (дата обращения: 24.04.2022).

Программное обеспечение предусматривает дружелюбный пользовательский интерфейс, который позволяет оператору установить диаметр колонки или необходимый уровень токопроводности для каждого слоя (по мере необходимости).

Это достигается с помощью зеленой гистограммы в правой части дисплея (под названием «Уплотнение») — рисунок 4. Когда оператор перемещает виброфлот вверх и вниз, чтобы возвести вертикальный столб, эта зеленая полоса опустошается или заполняется, и на обоих концах гистограммы красная стрелка меняет направление, указывая оператору, в каком именно направлении двигаться (вверх или вниз).

В дальнем правом столбце (рис. 4) оранжевым цветом отображается уже установленный столб, зеленым — текущий интервал глубины, на котором производится установка, а белым — оставшиеся интервалы до завершения установки этого столба⁶.

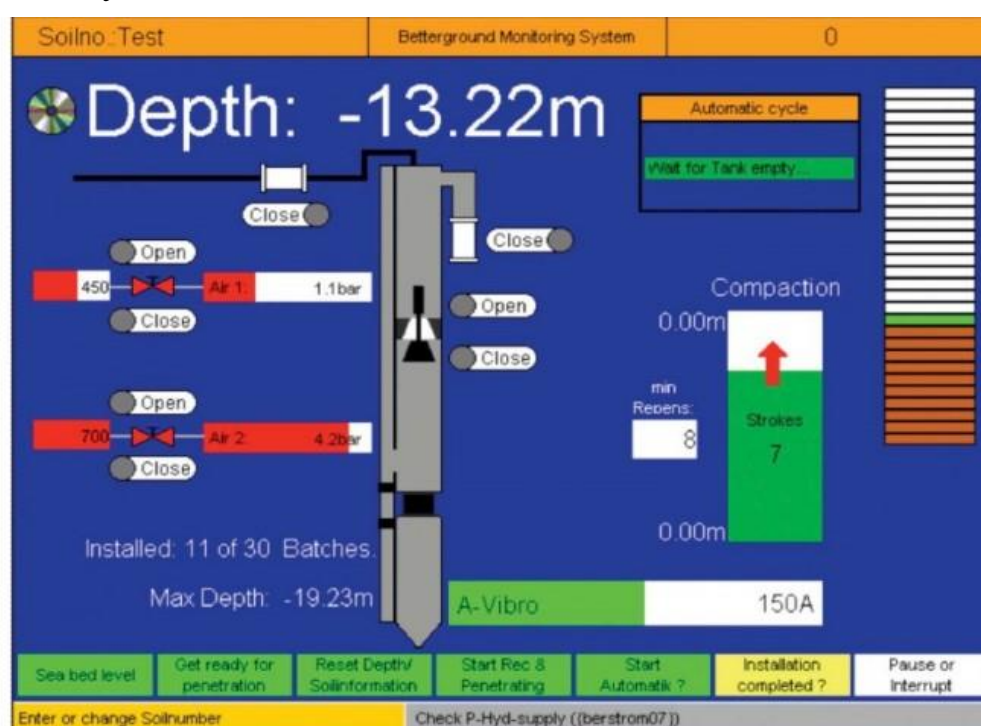


Рисунок 4. Операторская система наведения⁶

Figure 4. Operator guidance system

Контроллеры клапанов для различных камер воздушного шлюза установки впрыска системы с камерой под давлением показаны в левой части дисплея, показывая состояние клапана, расход инертного материала и давление.

В нижней части экрана ряд кнопок (зеленые, последняя желтая) показывает текущее положение объекта для управляющего компьютера в процессе установки столба в воде (озеро, море, залив). Оператор работает последовательно от крайней левой до крайней правой кнопки во время

процесса установки; желтым цветом показан текущий шаг, зеленым — уже выполненные шаги.

Таким образом, дружелюбный и логичный интерфейс ПО позволяет операторам управлять системой без ошибок⁶.

Ниже на рисунке 5 приведена типичная распечатка мониторинга состояния вертикального столба постоянного диаметра с нижней подачей щебня.

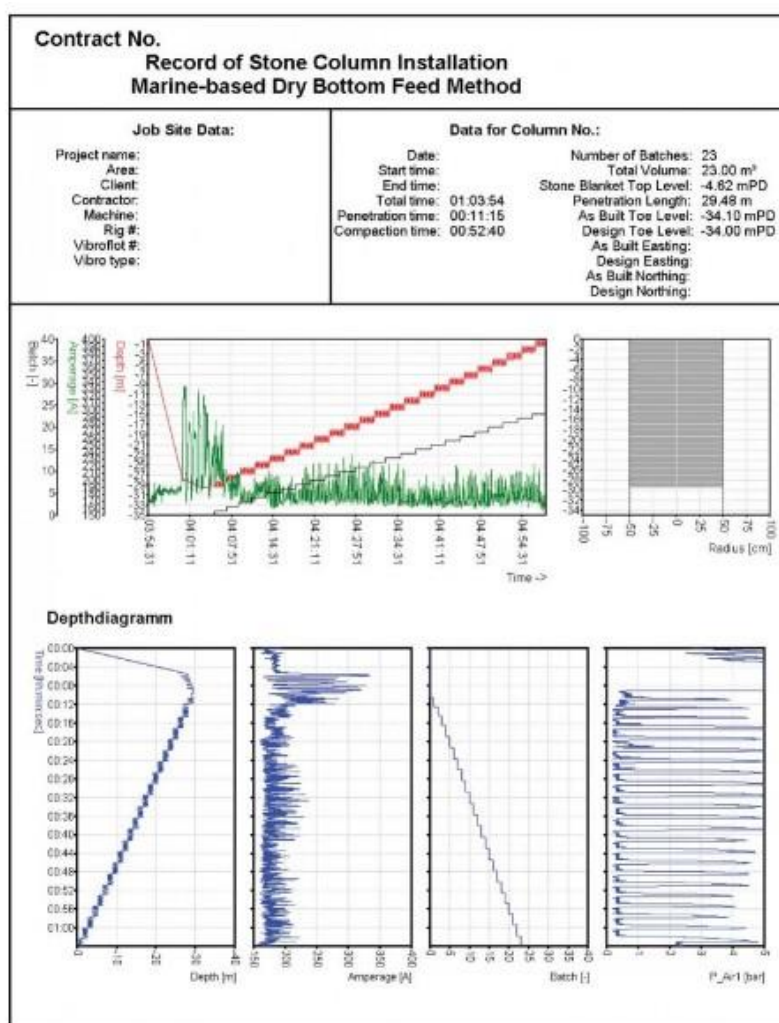


Рисунок 5. Мониторинг состояния вертикального столба из щебня⁶

Figure 5. Monitoring the condition of a vertical shafts of gravel chippings

Непрерывно (каждую секунду) во время установки вертикального столба считываются и сохраняются следующие параметры:

- глубина;
- сила тока;
- давление воздуха;
- наклонение.

Регистратор (рис. 3) может быть подключен к датчикам для определения:

- Глубины (с отклоняющими роликами или лазером).
- Гидравлическое давление.
- Давление воды или бетонного раствора.
- Скорость потока щебня в обсадной трубе.
- Наклон мачты в направлениях X и Y.
- Измерение частоты вибраций на вибродатчике.

Эти параметры могут быть проанализированы с использованием специального программного обеспечения или в Excel.

На рисунке 6 представлен увеличенный укрупненный график для отслеживания изменения параметров во время формирования скважины буровой установкой и в ходе последующей установки колонны.

Контроль качества для вертикальных столбов из щебня также должен выполняться в обязательном порядке.

На рисунке 6 показан фрагмент вертикального столба из щебня, на котором допущена и визуальна отражена технологическая ошибка его возведения на глубине от 8 до 10 м. Можно предположить, что в этом диапазоне глубин оператор недостаточно часто перемещал буровую установку вверх и вниз, в результате агрегат выбрасывал в сформированную скважину минимальное количество щебня. Такая ошибка может привести к нарушению или потере устойчивости вертикального столба из щебня.

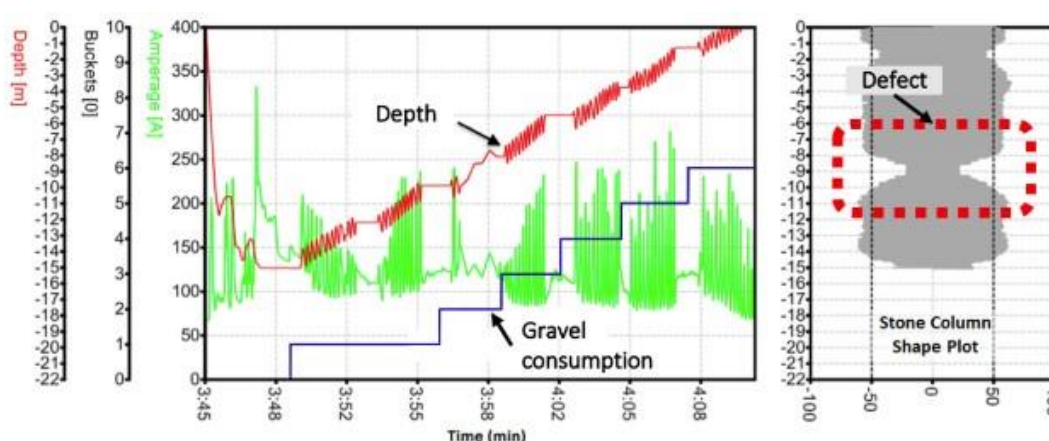


Рисунок 6. Ошибка возведения
вертикального столба из щебня на глубине от 8 до 10 м⁶

Figure 6. Error in the construction
of a vertical shafts of gravel chippings at a depth of 8 to 10 m

Система контроля, встроенная в ПО бортового компьютера установки ВС-1, позволяет отслеживать подобные отклонения уже на этапе производства работ, устранять их, обеспечивая надежное укрепление грунтов основания транспортного объекта.

Вывод

Conclusion

Строительство транспортных объектов в сложных природно-климатических условиях требует использования новых технологий, современного оборудования и средств механизации, способов организации работ для обеспечения надежности и долговечности сооружения.

По данным теплофизических расчетов, определяется наиболее благоприятный период для эффективного производства работ по устройству вертикальных столбов из щебня (август, сентябрь и октябрь).

В статье рассмотрены возможности программного обеспечения используемого оборудования ВС-1 с точки зрения реализации мониторинга и контроля качества сооружения вертикальных столбов из щебня. Установлено, что его использование позволяет повысить качество и безопасность сооружаемого объекта, сократить время на мониторинг, свести к минимуму количество задействованных людей на объекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Деген, У.** Использование щебеночных и песчаных свай для усиления слабых грунтов основания транспортных сооружений / У. Деген, П. Г. Долгов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 05–06 апреля 2017 года / М.: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2017. — С. 73–74. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35052358> (дата обращения: 24.04.2022).
2. **Луцкий, С.Я.** Технология и эффективность ускорения консолидации слабого основания земляного полотна / С.Я. Луцкий, А.Я. Ландсман, В.А. Заболотный // Наука и техника транспорта. — 2019. — № 4. — С. 60–64. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41501092> (дата обращения: 24.04.2022).
3. **Castro, J.** Modeling Stone Columns / J. Castro. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma10070782> // Materials. — 2017. — Т 10. — № 7. — С. 782. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/7/782> (дата обращения: 24.04.2022).
4. **Becker, P.** Volume Averaging Technique in numerical modelling of floating deep mixed columns in soft soils / P. Becker, M. Karstunen // Proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering, Rotterdam, the Netherlands, 24–27 March 2013 / Роттердам: Taylor&Francis, 2013. — URL: https://www.researchgate.net/publication/282607801_Volume_Averaging_Technique_in_numerical_modelling_of_floating_deep_mixed_columns_in_soft_soils (дата обращения: 24.04.2022).

5. **Chen, J.F.** Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment / J.F. Chen, L.Y. Li, J.F. Xue, S.Z. Feng. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.016> // Geotextiles and Geomembranes. — 2015. — Т 43. — № 5. — С. 424–431. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114415000540> (дата обращения: 24.04.2022).
6. **Sondermann, W.** Field Measurements and Numerical Analysis of the Stress Distribution below Stone Column Supported Embankments and their Stability / W. Sondermann, F. Kirsch // International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. / Нордвейкерхаут, 2003.
7. **Pivarč J.** Stone Columns — Determination of the soil improvement factor / J. Pivarč. — DOI <https://doi.org/10.2478/v10189-011-0014-z> // Slovak Journal of Civil Engineering. — 2011. — Т 19. — № 3. — С. 17–21. — URL: <https://sciendо.com/article/10.2478/v10189-011-0014-z> (дата обращения: 24.04.2022).
8. **Шепитько, Т.В.** Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко, П.Г. Долгов. — DOI <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78> // Мир транспорта. — 2019. — Т 17. — № 4. — С. 68–78. — URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1707> (дата обращения: 24.04.2022).
9. **Артюшенко, И.А.** Зависимость физико-механических характеристик и коэффициента безопасности грунтового массива от шага расстановки вертикальных столбов из щебня / И.А. Артюшенко. — DOI <https://doi.org/10.15862/17SATS220> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — С. 17SATS220. — URL: <https://t-s.today/17SATS220.html> (дата обращения: 24.04.2022).
10. **Колос, А.Ф.** Новые принципы и подходы планирования организации транспортного строительства / А.Ф. Колос, В.В. Ганчиц, В.А. Черняева // Транспортное строительство. — 2017. — № 1. — С. 6–9. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30040768> (дата обращения: 24.04.2022).
11. **Прокудин, И.В.** Календарное планирование железнодорожного строительства / И.В. Прокудин // Транспортное строительство. — 2012. — № 1. — С. 32. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21057864> (дата обращения: 24.04.2022).
12. **Шепитько, Т.В.** Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко. — DOI <https://doi.org/10.15862/10SATS419> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 4. — С. 10SATS419. — URL: <https://t-s.today/10sats419.html> (дата обращения: 24.04.2022).
13. **Шепитько, Т.В.** Строительство путей сообщения на Севере / Т.В. Шепитько, П.М. Токарев, А.Н. Дудников, А.М. Черкасов. — Ред. Луцкий С.Я. — Москва: ЛАТМЭС, 2009. — 284 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19643057> (дата обращения: 24.04.2022).
14. **Шепитько, Т.В.** Технологические особенности строительства и реконструкции геотехнических сооружений в криолитозоне / Т.В. Шепитько, Г.И. Нак, А.М. Черкасов, С.Я. Луцкий // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике / Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова Салехард: Б. и., 2021. — С. 484–487. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47470914> (дата обращения: 24.04.2022).
15. **Salahi, A.** Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon / A. Salahi, H. Niroumand, K. Kassim // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. — 2015. — Т 20. — № 2. — С. 739–759. — URL: https://www.researchgate.net/publication/282242013_Evaluation_of_stone_columns_versus_liq_ufaction_phenomenon (дата обращения: 24.04.2022).

Сведения об авторах:

Шепитько Таисия Васильевна — доктор технических наук, профессор, директор, Институт пути, строительства и сооружений, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Артюшенко Игорь Александрович — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: tywka351@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=988867

Зайцев Андрей Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Статья получена: 13.05.2022. Принята к публикации: 12.07.2022. Опубликовано онлайн: 26.07.2022.

REFERENCES

1. Degen U., Dolgov P.G. [The use of crushed stone and sand piles to strengthen weak soils of the foundation of transport facilities]. In: *[Modern problems of design, construction and operation of the railway track: Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants, Moscow, 05–06 April 2017]*. Moscow: Moscow State University of Communications of the Emperor Nicholas II; 2017. p. 73–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35052358> (accessed 24th April 2022). (In Russ.).
2. Lutskiy S.Ya., Landsman A.Ya., Zabolotnyy V.A. [Technology and Efficiency of Accelerated Consolidation of Weak Subgrade Subgrade]. *Science and Technology in Transport*. 2019; (4): 60–64. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41501092> (accessed 24th April 2022). (In Russ.).
3. Castro J. Modeling Stone Columns. *Materials*. 2017; 10(7): 782. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10070782>.
4. Becker P., Karstunen M. Volume Averaging Technique in numerical modelling of floating deep mixed columns in soft soils. In: *Proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering, Rotterdam, the Netherlands, 24–27 March 2013*. Rotterdam, Netherlands: Taylor&Francis; 2013. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282607801_Volume_Averaging_Technique_in_numerical_modelling_of_floating_deep_mixed_columns_in_soft_soils (accessed 24th April 2022). (In Eng.).
5. Chen J.F., Li L.Y., Xue J.F., Feng S.Z. Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment. *Geotextiles and Geomembranes*. 2015; 43(5): 424–431. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.016>.
6. Sondermann W., Kirsch F. Field Measurements and Numerical Analysis of the Stress Distribution below Stone Column Supported Embankments and their Stability. In: Vermeer, Schweiger, Karstunen & Cudny (eds.). *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*. Noordwijkerhout, Netherlands: 2003. (In Eng.).
7. Pivarč J. Stone Columns — Determination of the soil improvement factor. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2011; 19(3): 17–21. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/v10189-011-0014-z>.
8. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. Base Soil Reinforcement with Vertical Crushed Stone Columns in Cryolithozone. *World of Transport and Transportation*. 2019; 17(4): 68–78. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78>.
9. Artyushenko I.A. Dependence of physico-mechanical characteristics and safety factor of the soil mass on the spacing of vertical pillars of crushed stone. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(2): 17SATS220. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/17SATS220>.
10. Kolos A.F., Ganchits V.V., Chernyayeva V.A. [New principles and approaches to planning the organization of transport construction]. *Transport construction*. 2017; (1): 6–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30040768> (accessed 24th April 2022). (In Russ.).

11. Prokudin I.V. [Railway construction scheduling]. *Transport construction*. 2012; (1): 32. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21057864> (accessed 24th April 2022). (In Russ.).
12. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(4): 10SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/10SATS419>.
13. Shepit'ko T.V., Tokarev P.M., Dudnikov A.N., Cherkasov A.M. [Construction of communication lines in the North]. Moscow: LATMES; 2009. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19643057> (accessed 24th April 2022). (In Russ.).
14. Shepitko T.V., Nak G.I., Cherkasov A.M., Lutskiy S.Ya Technological features of construction and reconstruction of geotechnical structures in permafrost. In: V.P. Melnikov and M.R. Sadurtdinov (eds.). *Cryosphere Transformation and Geotechnical Safety in the Arctic*. Salekhard: 2021. p. 484–487. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47470914> (accessed 24th April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Salahi A., Niroumand H., Kassim K. Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015; 20(2): 739–759. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282242013_Evaluation_of_stone_columns_versus_liquefaction_phenomenon (accessed 24th April 2022). (In Eng.).

Information about the authors:

Taisia V. Shepitko — Institute of Way, Construction and Structures, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: shepitko-tv@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=480532

Igor A. Artyushenko — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: tywka351@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=988867

Andrey A. Zaytsev — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-0552>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=772051

Submitted: 13th May 2022. Revised: 12th July 2022. Published online: 26th July 2022.