

Научная статья

УДК 625.7/8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-772-789>

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЩЕБНЯ НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОЩЕБЕНОЧНОГО СЛОЯ

А.С. Пролыгин, А.С. Александров, Г.В. Долгих, В.В. Чусов*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),**г. Омск, Россия**aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,**aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,**dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,**chysow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является исследование зависимости модуля деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды от содержания щебня в грунтово-щебеночной смеси и влажности грунта в ней. Поставленная цель достигнута выполнением штамповых испытаний моделей дорожных одежд и земляного полотна.

Материалы и методы. Исследования проведены выполнением штамповых испытаний моделей земляного полотна и однослойных дорожных одежд с грунтощебеночным покрытием. Перед штамповыми испытаниями проведены лабораторные работы по определению параметров, подлежащих входному контролю для щебня и грунта. Из щебеночных материалов и грунта в лотке построены модели дорожных одежд. Испытания земляного полотна и дорожных одежд выполнены при помощи жесткого круглого штампа, входящего в комплект стандартной установки.

Результаты. Модули деформации грунта земляного полотна и дорожных одежд с грунтощебеночным слоем вычислены из полиномиальной зависимости осадки от давления, регламентированной ПНСТ 311–2018. По результатам испытаний определен модуль деформации грунта земляного полотна и общий модуль деформации на поверхности грунтощебеночного слоя, при различном содержании щебня по объему смеси. Наименьшее значение модуля деформации соответствует минимальному содержанию щебня в смеси, которое составляет 40% по объему смеси. Наибольшее значение модуля деформации получено при максимальном содержании щебня в смеси, которое составляет 60% по объему смеси. Используя общие модули деформации разных дорожных одежд и модули деформации грунта земляного полотна, выполнен расчет модуля деформации грунтощебеночного слоя при разном содержании в нем щебня. Для учета влияния влажности связного грунта, используемого в смеси, приведены поправочные коэффициенты, значения которых установлены лабораторными испытаниями. Эти коэффициенты позволяют рассчитывать модуль деформации грунтощебеночного слоя в зависимости от содержания щебня и влажности грунта, применяемого в нем.

Обсуждение и заключение. В результате экспериментальных работ определены модули деформации грунтощебня разных составов, при помощи которых произведено проектирование дорожных одежд с последующим строительством опытных участков в каждой из трех ДКЗ Омской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожная одежда, грунтощебеночный слой, модуль деформации, влажность

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пролыгин А.С., Александров А.С., Долгих Г.В., Чусов В.В. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 772-789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>

© Пролыгин А.С., Александров А.С., Долгих Г.В., Чусов В.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-772-789>

INFLUENCE OF CRUSHED STONE CONTENT ON THE DEFORMATION MODULUS OF THE SOIL-CRUSHED STONE LAYER

Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov, Gennady V. Dolgikh, Vasiliy V. Chusov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) Omsk, Russia

aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

chysow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is to study the dependence of the deformation modulus of the soil-crushed stone layer of the road surface from the content of crushed stone in the soil-crushed stone mixture and the soil moisture in it. The goal was achieved by performing stamp tests of the models of a road clothing and a roadbed.

Materials and methods. The research was carried out by performing stamp tests of models of the roadbed and single-layer road clothes with a soil-crushed stone surface. Before the stamp tests, laboratory work was carried out to determine the parameters subject to input control for crushed stone and soil. Models of road clothes are built from crushed stone materials and soil in the tray. Tests of the roadbed and road clothes are carried out using a rigid round stamp included in the standard kit.

Results. The modules of deformation of the soil of the roadbed and road surfaces with a soil-crushed stone layer are calculated from the polynomial dependence of settlement on pressure, regulated by ПНСТ 311-2018. According to the test results, the modulus of deformation of the soil of the roadbed, and the general modulus of deformation on the surface of the soil-crushed stone layer, with different content of crushed stone by the volume of the mixture, were determined. The lowest value of the deformation modulus corresponds to the minimum content of crushed stone in the mixture, which is 40 % by volume of the mixture. The highest value of the deformation modulus was obtained at the maximum content of crushed stone in the mixture, which is 60 % by volume of the mixture. Using the general modules of deformation of different road surfaces and the modules of deformation of the soil of the roadbed, the calculation of the deformation modulus of the soil-crushed stone layer with different content of crushed stone in it is performed. To take into account the influence of moisture of the cohesive soil used in the mixture, correction coefficients are given, the values of which are established by laboratory tests. These coefficients allow us to calculate the modulus of deformation of the soil-crushed stone layer depending on the content of crushed stone and the moisture of the soil used in it.

Discussion and conclusions. As a result of experimental work, the modules of deformation of soil-crushed stone of different compositions were determined, with the help of which the design of road surfaces was carried out with the subsequent construction of experimental sites in each of the three road building climatic zones of the Omsk region.

KEYWORDS: road surface, soil-crushed stone layer, modulus of deformation, moisture content

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

For citation: Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed stone layer. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 772-789. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>

© Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно требованиям ГОСТ 33382–2015¹, автомобильные дороги общего пользования России подразделяются на три класса (автомобильные магистрали, дороги для скоростного движения, обычные дороги) и пять технических категорий (I–V). Класс характеризует условия доступа на автомобильную дорогу, а категория определяет технические параметры. В соответствии с требованиями СП 34.13330–2021² критерием разделения дорог на категории является ее класс и расчетная среднесуточная приведенная интенсивность движения. В последнее время в РФ в отдельную группу выделены дороги с низкой интенсивностью движения. Для таких дорог разработаны специальные стандарты ГОСТ Р 58818–2020³, ПНСТ 371–2019⁴, устанавливающие правила их проектирования. Интенсивность движения на таких дорогах ограничивается величиной до 400 автомобилей в сутки. Поэтому дороги с низкой интенсивностью движения включают в себя дороги общего пользования V категории и часть дорог IV категории. Вследствие низкой интенсивности движения такие дороги, как правило, проходят в малозаселенной сельской местности. Суммарная протяженность дорог с низкой интенсивностью движения велика, но они не требуют постройки дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями. Поэтому для таких дорог, как правило, предусматривают устройство дорожных одежд переходного и низшего типов, состоящих из двух-трех, а часто и одного конструктивного слоя. Постройка таких дорожных одежд актуальна для всех муниципальных районов Омской области. По данным Федеральной службы государственной статистики, протяженность сети дорог Омской области составляет 24024,2 км. Из них 730 км приходится на дороги федерального значения, 10207 км составляет суммарная протяженность дорог регионального или межмуниципального значения и протяженность 13087,2 км формируется сетью дорог местного значения. Дороги федерального

значения на всем своем протяжении имеют дорожные одежды с усовершенствованным покрытием. Протяженность дорог регионального или межмуниципального значения, имеющих твердое покрытие, составляет 7365,5 км, из которых 6106,1 км имеет дорожные одежды с усовершенствованным покрытием. Следовательно, протяженность дорог регионального или межмуниципального значения с грунтовой поверхностью составляет 2841,5 км. На автомобильных дорогах местного значения ситуация еще хуже. Местные дороги с грунтовой проезжей частью имеют протяженность 7180,8 км. Таким образом, согласно государственным статистическим данным, суммарная протяженность грунтовых дорог Омской области составляет 10022,3 км. Для демонстрации масштаба этой беды Омской области сравним суммарную протяженность грунтовых дорог с длиной экватора Земли, составляющей около 40075,7 км. В результате получим, что протяженность грунтовых дорог Омской области составляет $\frac{1}{4}$ длины экватора Земли. Отсюда становится очевидной необходимость постройки дорог низшего и переходного типов в сельской местности Омской области. Безусловно, что объемы строительства огромны, они требуют больших материальных затрат. Поэтому дорожные одежды низшего типа можно рассматривать как основные, используемые в качестве постоянных конструкций на дорогах категории VB, а также конструкций, применяемых на первом этапе строительства дорожных одежд переходного типа, для дорог более высоких категорий.

Дорожные одежды переходного типа проектируют по методике, регламентируемой нормативными документами, выполняя расчеты на прочность, морозоустойчивость и осушение дополнительных дренирующих слоев основания. Причем методики расчета таких дорожных одежд, проектируемых на дорогах общего пользования и дорогах с низкой интенсивностью, по критериям прочности и эксплуатационной надежности принципиально отличаются. Такое различие в методах расчета

¹ ГОСТ 33382–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. Введен в действие 08.09.2016. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

² СП 34.13330–2021. Автомобильные дороги. Введен в действие 10.08.2021. Пересмотр 34.13330.2012* «СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги». М.: АО «Кодекс», 2021.

³ ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 15.04.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020.

⁴ ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

дорожных одежд для дорог с низкой и высокой интенсивностью движения характерно для стандартов США. Теперь различный подход к расчету дорожных одежд в зависимости от интенсивности движения появился в нашей стране.

Конструкции дорожных одежд низшего типа назначают по региональным нормативным документам, содержащим типовые конструкции, разработанные на основе практического опыта. В дорожных одеждах низшего типа рекомендуется применять местные материалы и отходы промышленности. Поэтому в зависимости от наличия в регионе тех или иных материалов и отходов промышленности конструкции дорожных одежд в субъектах Российской Федерации могут существенно отличаться.

В нефтедобывающих районах России выполняются работы по применению нефтяного шлама в органоминеральных дорожных смесях [1, 2, 3]. В районах с развитой металлургической промышленностью в конструкции дорожных одежд внедряют шламы. В работах [4, 5, 6] приводятся данные об изменении характеристик белитового шлама, являющегося отходом алюминиевой промышленности, в дорожной конструкции в процессе приложения повторных нагрузок. В горных районах появляется возможность применения крупнообломочных грунтов для сооружения прочного и деформационно-устойчивого земляного полотна и использования порошков горных пород для укрепления готовых щебеночно-песчаных смесей. В этой части отметим работу наших коллег из Армении [7], в которой исследовано влияние количества известнякового порошка, добавляемого в щебеночно-песчаные смеси, на параметры прочности готового материала. Известняковые порошки являются промышленным отходом горной промышленности Араратской области. В конструкциях дорожных одежд низшего и переходного типов широко применяются грунты и гранулированные материалы, укрепленные или стабилизированные вяжущими материалами и различными добавками [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Необходимость химической стабилизации грунтов и укрепления зернистых материалов обусловлена как их невысокой прочностью, так и способностью накапливать остаточные деформации при сравнительно небольшой величине девиатора напряжений [22, 23, 24, 25, 26, 27]. Малая устойчивость гранулированных материалов к накоплению остаточных деформаций приводит к образованию колеи на поверхности дорожного покры-

тия [28]. Альтернативой химической стабилизации грунтов и гранулированных материалов является применение особых конструктивных решений. К таким решениям можно отнести армирование слоя из гранулированного материала геосинтетической решеткой [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35] или усиление слоя под местами будущего образования колеи специальными потайными элементами, устраиваемыми под покрытием или дорожной одеждой в продольном направлении [25].

Омская область, как и некоторые другие регионы РФ, практически не имеет местных строительных материалов, вследствие чего для строительства земляного полотна изучают возможность применения зол уноса и золошлаковых смесей [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. Для строительства дорожных одежд переходного и низшего типа применяют дорогостоящие привозные материалы, такие как щебень и щебеночно-песчаные смеси. В целях экономии щебня выполняют исследования по применению грунтово-щебеночных смесей как в чистом виде, так и укрепленных цементом. Кроме того, изучается возможность применения в таких дорожных одеждах асфальтового гранулята, получаемого при фрезеровании существующих покрытий ремонтируемых дорог. Этот повторно используемый материал применяют как без добавки вяжущих материалов, так и с добавлением органических и минеральных вяжущих материалов.

В настоящей работе авторы приведут данные о модулях деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды, рассчитанного по результатам испытаний моделей дорожных одежд жестким штампом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вычисление модуля деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды требует проведения экспериментов по определению модулей деформации на поверхности земляного полотна и дорожной одежды, состоящей из одного грунтощебеночного слоя. Для этого необходимо выполнить штамповые испытания на поверхности грунтощебеночного слоя (при известной толщине этого слоя) дорожной одежды и на земляном полотне. Полученные из эксперимента значения модулей деформации грунта земляного полотна и дорожной одежды из грунтощебеночного слоя используют для расчета модуля деформации грунтово-щебеночной смеси в слое. Вычисления производятся по стандартной нормативной методике. Проведение экспериментов требует

строительства опытных участков или моделей дорожных конструкций. При строительстве моделей дорожных одежд необходимо контролировать все параметры грунтов и щебня, применяемых для устройства земляного полотна и грунтощебеночного слоя.

Для строительства моделей дорожных одежд использован грунт, классифицирован-

ный по ГОСТ 25100–2020⁵, как суглинок тяжелый пылеватый. Показатели механических свойств грунта определены испытаниями в лаборатории по стандартизированным методам. На рисунке 1 приведены результаты лабораторного определения максимальной плотности и оптимальной влажности, выполненного с соблюдением требований ГОСТ 22733–2016⁶.

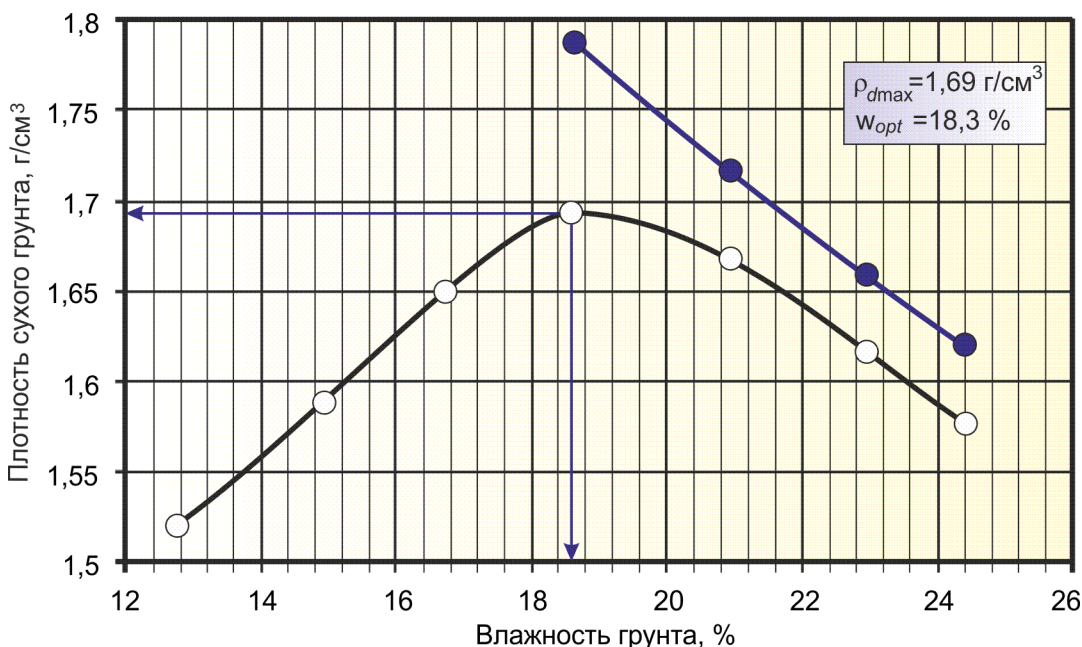


Рисунок 1 – Кривая стандартного уплотнения и линия нулевого содержания воздуха в грунте

Figure 1 – Standard compaction curve and the line of zero air content in the soil

Гранулометрический состав грунта определен согласно указаниям ГОСТ 12536–2014⁷, а результаты лабораторных работ приведены в таблице 1.

Таблица 1
Гранулометрический состав грунта

Table 1
Grain size distribution

Размер частиц, мм	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	0,01	<0,01
Содержание частиц, %	0	0	1	5	20	87	87	100

Определение физических характеристик проведено с соблюдением требований ГОСТ 5180–2015⁸, а результаты обработки данных лабораторных испытаний даны в таблице 2.

⁵ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Введен в действие 01.01.2021. Взамен ГОСТ 25100–2011. М.: Стандартинформ, 2020.

⁶ ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Введен в действие 01.01.2017. Взамен ГОСТ 22733–2002. М.: Стандартинформ, 2019.

⁷ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019.

⁸ ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введен в действие 01.04.2016. Взамен ГОСТ 5180–84. М.: Стандартинформ, 2019.

Таблица 2
Показатели физических свойств грунта

Table 2
Indicators of physical properties of the soil

Наименование показателя	Величина
Естественная влажность, %	19,9
Влажность на границе текучести, %	36,6
Влажность на границе раскатывания, %	19,5
Число пластичности, %	16,8
Показатель текучести, д.е.	0,03
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,68

Таблица 3
Зерновые составы щебня

Table 3
Grain size distribution of crushed stone

Параметр	Значения параметров						
Результаты испытания щебня фракции 20–40 мм							
Размер сита, мм	50	40	30	20	2,5	1,25	дно
Частный остаток, %	0	4,69	31,05	54,63	9,53	0,00	0,10
Полный остаток, %	0	4,7	35,74	90,37	99,89	99,90	100
Требования ГОСТ 8267–93	< 0,5	< 10	30–60	90–100	95–100	95–100	–
Результаты испытания щебня фракции 40–70 мм							
Размер сита, мм	70	60	50	40	2,5	1,25	дно
Частный остаток, %	1,61	9,14	24,85	36,32	27,30	0,20	0,58
Полный остаток, %	1,61	10,7	35,60	71,92	99,22	99,42	100
Требования ГОСТ 8267–93	< 0,5	< 10	30-60	90-100	95-100	95-100	–

Для строительства моделей однослойных дорожных одежд из грунтово-щебеночных смесей применяли щебень двух фракций 20–40 мм и 40–70 мм. Щебень обеих фракций испытан согласно требованиям ГОСТ 8269.0–97⁹ для определения соответствия контролируемых параметров регламентациям ГОСТ 8267–93¹⁰. В таблице 3 приведены результаты определения зерновых составов щебня обеих фракций и требования к ним.

В таблице 4 приведены результаты определения контролируемых параметров щебня и их требуемые значения. Соответствие зна-

чений этих параметров требованиям стандарта необходимо для качественного устройства моделей дорожных одежд в грунтовом лотке, расположенном в лабораторном помещении.

Из анализа данных таблиц 3 и 4 следует, что щебень обеих фракций пригоден для строительства моделей дорожных одежд.

По используемой фракции щебня модели дорожной одежды разделяли на две группы. В моделях первой группы применяли щебень фракции 20–40 мм, а в моделях второй группы использован щебень фракции 40–70 мм. В моделях каждой группы строили три секции

⁹ ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Введен в действие 06.01.1998. Взамен ГОСТ 3344–83, ГОСТ 7392–85 в части методов физико-механических испытаний, ГОСТ 8269–87. М.: Стандартинформ, 2018.

¹⁰ ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введен в действие 17.06.1994. Взамен ГОСТ 8267–82, ГОСТ 8268–82, ГОСТ 10260–82, ГОСТ 23254–78, ГОСТ 26873–86. М.: Стандартинформ, 2018.

Таблица 4
Значения контролируемых параметров щебня

Table 4
Values of controlled parameters of crushed stone

Наименование показателя	Значение показателя для щебня фракций		Требования стандарта
	20–40 мм	40–70 мм	
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,34	0,50	До 1
Дробимость, %	9,19	8,34	До 11 для марки 1200
Содержание зерен пластинчатой и лещадной формы, %	2	29	Группа 1 до 10%
			Группа 3 – 15–25%
			Группа 4 – 25–35%
Истинная плотность, г/см ³	2,81	2,75	–
Насыпная плотность, кг/м ³	1536,6	1406,85	–

грунтощебеночного слоя. Содержание щебня в грунтово-щебеночной смеси, применяемой для строительства секций, было разное. В первой секции содержание щебня составляет 40% по объему смеси, во второй секции – 50% и в третьей секции – 60%.

При строительстве модели земляного полотна применяли послойную отсыпку. При отсыпке каждого слоя грунт, высушенный до оптимальной влажности $w_{\text{opt}}=18,3\%$, распределяли ровным слоем толщиной 11–12 см. Уплотнение грунта выполнялось ручной трамбовкой и вибрационной плитой. В итоге получался слой грунта толщиной около 10 см, уплотненный до требуемой величины коэффициента уплотнения. Высота модели земляного полотна наращивалась постепенно, выполняя перечисленные операции при устройстве каждого слоя.

По завершению строительства земляного полотна были произведены штамповые испытания статической нагрузкой. Лоток снабжен металлической упорной балкой, представляющей собой конструкции из швеллеров. Нагрузка на испытываемую поверхность создается за счет упора домкрата в металлическую балку. Упорная металлическая балка снабжена колесами, которые перемещаются по рельс-формам, установленным на поверхности боковых стенок лотка. Возможность перемещения упорной балки по длине лотка позволяет производить испытание в любом выбранном поперечном сечении модели земляного полотна. В пределах этого сечения выбирали точку ис-

пытаний, в которой монтировалась штамповая установка.

Перед испытанием каждой точки производили подготовку поверхности земляного полотна, устраняя все неровности, а при необходимости выполняя подсыпку сухого песка. Далее устанавливали штамп, обеспечивая его полное прилегание к грунтовой поверхности. Для этого установленный на грунтовой поверхности штамп поворачивали влево и вправо (по часовой стрелке и против нее), притирая штамп к грунту или песчаной подсыпке. Штамповая установка снабжена гидравлическим домкратом, вертикальная ось которого строго совпадает с центром штампа. Для измерения нагрузки использован электронный динамометр, которым снабжен домкрат. Деформации определяли при помощи индикаторов, которые устанавливали в задней части длиннобазового прогибомера, используя специальное зажимное устройство. Применение длиннобазового прогибомера позволяет исключить попадание пяты прогибомера в чашку прогибов, образуемую распространением упругих деформаций грунта за пределы штампа. При установке прогибомера его наконечник вводили в тоннель штампа и располагали точно над центральной точкой круглого штампа, не допуская эксцентриситета нагрузки. Таким образом, расчетной точкой испытания являлся центр жесткого круглого штампа. Основные моменты строительства модели земляного полотна и ее испытания приведены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Иллюстрации строительства и испытания модели земляного полотна: а – подготовленный лоток; б – разравнивание грунта; в – трамбовка слоя; г – уплотнение слоя вибрационной плитой; д – установка штампа; е – испытание; ж – отбор грунта после испытания для определения влажности

Figure 2 – Illustrations of construction and testing a model of subgrade: а–prepared tray; б–leveling the soil; в–layer compaction; г–compaction of the layer with a vibroplate; д–stamp installation; е–test; ж–sampling of soil after testing to determine moisture

Завершив испытание модели земляного полотна, приступали к строительству модели дорожной одежды из грунтощебеночного слоя, содержащего щебень фракции 20–40 мм. При этом производили разбивку лотка на три секции. В пределах каждой секции устраивали грунтощебеночный слой с определенным содержанием щебня. Для приготовления грунто-щебеночной смеси отмеряли необходимые объемы грунта, имеющего оптимальную влажность, и щебня. Грунт и щебень подавали в секцию лотка и смешивали вручную. Одно-

родность получаемой смеси контролировали визуально. При положительной оценке однородности смеси ее разравнивали и уплотняли вибрационной плитой. По завершению строительства модели ее испытывали, после чего демонтировали, подготавливая грунтовую поверхность для строительства другой модели с использованием щебня фракции 40–70 мм.

На рисунке 3 приведены основные технологические операции по строительству грунтощебеночного слоя.



Рисунок 3 – Иллюстрации строительства модели грунтощебеночного слоя: а – подача требуемого количества грунта в секцию; б – подача в секцию щебня в требуемом количестве; в – смешивание щебня и грунта; г – визуальная оценка однородности; д – уплотнение слоя вибрационной плитой; е – демонтаж слоя после испытания

Figure 3 – Illustrations of construction a model of a soil-crushed-stone layer: а–supply of the required amount of soil to the section; б–supply of crushed stone to the section in the required amount; в–mixing crushed stone and soil; г–visual assessment of homogeneity; д–compaction of the layer with a vibroplate; е–layer dismantling after testing

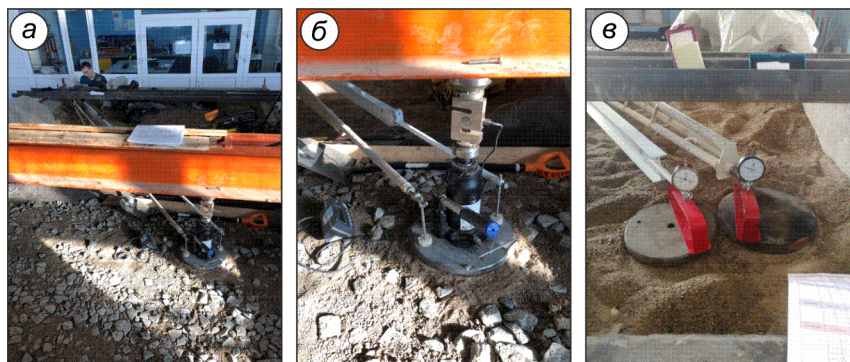


Рисунок 4 – Иллюстрации штамповых испытаний грунтощебеночного слоя: а – общий вид установки штамповых испытаний; б – расположение измерительных стержней прогибомера и гидравлического домкрата на штампе; в – расположение индикаторов, закрепленных в задней части прогибомеров и введенных в контакт с клиновой опорой

Figure 4 – Illustrations of stamping tests of a soil-crushed-stone layer: а–general view of the installation for stamp tests; б–location of measuring rods of the deflectometer and hydraulic jack on the stamp; в–location of indicators, fixed at the rear of the deflectometers and brought into contact with the wedge support

После устройства модели дорожной одежды выполняли штамповые испытания (рисунок 4).

Для испытаний грунтощебеночного слоя применяли жесткий круглый штамп, на который ставили гидравлический домкрат, обеспечивая совпадение его вертикальной оси с центром штампа. Нагрузку фиксировали по электронному динамометру. Для измерения деформаций применяли два прогибомера, измерительные стержни которых устанавливали

на одинаковых расстояниях от центра штампа. В зажимных устройствах, имеющихся в задней части прогибомера, крепили индикаторы. Измерительный стержень каждого индикатора вводили в соприкосновение с клиновой опорой, которой укомплектован каждый прогибомер. Клиновую опору ставили на жесткую металлическую подкладку.

Из анализа рисунков 2 и 4 следует, что методики штамповых испытаний земляного полотна и грунтощебеночной дорожной одежды отлича-

ются количеством применяемых прогибомеров и размещением их измерительных стержней на штампе. Отметим, что такие отличия не принципиальны, они обуславливают разный подход к вычислению осадок. При использовании одного прогибомера упругопластические осадки вычисляются по разности показаний индикатора до и после приложения нагрузки. Упругие деформации в стадии разгрузки земляного полотна определяются разностью показаний индикатора до и после снятия нагрузки. При применении двух прогибомеров, снабженных двумя индикаторами, упругопластические и упругие деформации измеряются по каждому индикатору, а их расчетные значения вычисляются как среднее из двух величин.

В остальном методика испытаний земляного полотна и грунтощебеночной дорожной одежды одинаковая. В обоих случаях нагрузка прикладывалась ступенями до тех пор, пока величина усилия не достигнет предельной величины. Предельная величина усилия определяется из условия возникновения максимального давления, которое ограничивается величиной 0,25 МПа при испытании земляного полотна и 0,5 при испытании дорожной одежды.

Деформации измеряли по достижению условной стабилизации осадки, наступление которой определяется выполнением двух условий. Согласно первому условию отсчеты с индикаторов снимают не ранее чем через 60 с при испытании конструктивных слоев дорожной одежды и не ранее чем через 120 с при испытании земляного полотна. Вторым условием наступления условной стабилизации осадки является снижение ее скорости до величины 0,02 мм/мин. Обратим внимание, что при использовании прогибомера деформация вычисляется произведением разности показаний по индикатору и коэффициента, величина которого определяется отношением длин плеч прогибомера. В составе нашей штамповой установки применены прогибомеры с соотношением длин плеч, равным 2. Поэтому критерием наступления условной стабилизации осадки является уменьшение скорости изменения показаний каждого индикатора до величины 0,01 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний получали в виде зависимостей осадок земляного полотна или до-

рожной одежды из грунтощебеночного слоя от давления. Эти зависимости использовали для вычисления модуля деформации грунта и общего модуля деформации дорожной одежды.

Анализ стандартов Российской Федерации показал, что в настоящее время для расчета модуля деформации грунта регламентируются три разных формулы. Первая зависимость вытекает из традиционной формулы для расчета осадки S_z полупространства от нагрузки, передаваемой круглым штампом. Решив эту зависимость относительно модуля деформации E_d , выводят формулу для его расчета. Традиционные формулы для расчета осадки (см) и модуля деформации (МПа) имеют вид:

$$S_z = \frac{a \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E_d}; \quad E_d = \frac{a \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_z}, \quad (1)$$

где a – коэффициент, учитывающий вид штампа и точку, в которой определяется осадка (для центра круглого жесткого штампа $a = \pi/4 \approx 0,79$); D – диаметр штампа, см; p – давление, передаваемое штампом, МПа; μ – коэффициент Пуассона (для крупнообломочного грунта $\mu = 0,27$; песков и супесей $\mu = 0,3$; суглинков $\mu = 0,35$ и глин $\mu = 0,42$).

В формулах (1) постулируется линейная зависимость осадки от давления. Такая линейная зависимость характерна для сравнительно небольшого диапазона давлений, ограничиваемого первой критической нагрузкой Н.М. Герсегова. В настоящее время ГОСТ 20276.1–2020 содержит регламент определения модуля деформации на линейном участке графической зависимости осадки от давления. Методика ГОСТ 20276.1–2020¹¹ содержит указания по определению координат начальной (p_0 и S_0) и конечной (p_n и S_n) точек этого линейного участка. Так как определение первой критической нагрузки по Н.М. Герсегову совпадает с определением конечного значения давления по ГОСТ 20276.1–2020, то обе эти величины давления характеризуют одно и то же предельное значение давления. При превышении давлением величины первой критической нагрузки или ее аналога p_n в трактовке ГОСТ 20276.1–2020 зависимость осадок от давления приобретает нелинейный характер. Поэтому при нелинейной зависимости осадки от давления модуль деформации зависит от нагрузки и уменьшается при увеличении дав-

¹¹ ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. Введен в действие 11.08.2020. Взамен ГОСТ 20276–2012 в части метода испытания штампом. М.: Стандартинформ, 2020.

ления. Учет такой зависимости осадки от давления требует выполнять расчет модуля деформации от приращений осадок и давлений, характерных для линейного участка графика. Поэтому стандарт ГОСТ 20276.1–2020 для расчета модуля деформации регламентирует формулу

$$E_d = (1 - \mu^2) \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79, этот коэффициент приблизительно равен коэффициенту a в формулах (1); Δp – приращения давления, МПа равное $\Delta p = p_n - p_o$; и ΔS – приращения осадки, см, соответствующее приращению давления Δp , равная $\Delta S = S_n - S_o$.

Две другие методики вычисления модуля деформации содержатся в стандартах дорожной отрасли ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018¹². Формулы этих методик позволяют вычислять как модуль деформации грунта земляного полотна, так и общий модуль деформации на поверхности каждого испытанного слоя и всей дорожной одежды.

Согласно методике, регламентируемой ПНСТ 371–2019, модуль деформации грунта и дорожной одежды вычисляют по формулам:

$$E_d = \frac{p}{\lambda}; \quad E_d = \frac{\pi \cdot p}{2 \cdot \lambda}; \quad \lambda = \frac{S}{D}, \quad (3)$$

где λ – требуемая величина относительной деформации, значение которой принимается в диапазоне $\lambda = 0,01 \dots 0,02$ для грунтов земляного полотна и $\lambda = 0,04 \dots 0,08$ для дорожных одежд.

Методика, регламентируемая ПНСТ 311–2018, исходит из предположения, что осадки штампа связаны с максимальной величиной давления на ступени приложения нагрузки $p_{\max}$ полиномиальной зависимостью второй степени, вследствие чего для расчета осадки штампа и модуля деформации регламентированы формулы:

$$S_z = a_0 + a_1 \cdot p_{\max} + a_2 \cdot p_{\max}^2; \quad E_d = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot p_{\max}}, \quad (4)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – постоянные многочлена второй степени; $p_{\max}$ – максимальная величина дав-

ления, переданного штампом на земляное полотно или дорожную одежду, при измерении, МПа.

Используя данные об упругих деформациях, возникающих при разгрузке испытываемой конструкции, методика ПНСТ 311–2018 позволяет вычислять модуль упругости грунта земляного полотна или дорожной одежды. Расчет модуля упругости выполняют по формуле:

$$E_{el} = \frac{0,75 \cdot D \cdot p_{\max 1}}{S_{el}}, \quad E_{el} = \frac{0,75 \cdot D}{S_{el}} \quad (5)$$

где $p_{\max 1}$ – максимальная величина давления, достигнутая на стадии нагрузки, МПа; S_{el} – упругая деформация, измеренная при разгрузке.

Для расчета модулей деформации земляного полотна и дорожной одежды применена формула (4). Некоторые из полученных нами экспериментальных зависимостей осадок земляного полотна и дорожных одежд от давления приведены в виде графиков на рисунке 5.

После выполнения штамповых испытаний дорожной одежды грунтощебеночный слой демонтировали, а непосредственно вблизи точек испытаний измеряли толщину слоя. Таким образом, в результате эксперимента получены значения модулей деформации грунта земляного полотна, общего модуля деформации дорожных одежд в пределах каждой секции и толщин грунтощебеночного слоя в точках его испытания. Для расчета модуля деформации грунтощебеночного слоя применена методика, регламентированная стандартом ПНСТ 371–2019. Расчет модуля деформации выполнялся методом последовательных приближений. Суть метода состоит в том, что необходимо задаться модулем деформации грунтощебеночного слоя. Затем при известных из данных экспериментов значениях модуля деформации земляного полотна, толщины слоя и диаметра штампа вычислить общий модуль деформации на поверхности дорожной одежды. Если значение вычисленного модуля деформации меньше значения, полученного на основе экспериментальных данных, то величину модуля деформации грунтощебеночного слоя повышают. Расчет выполняют до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между значениями модулей деформации дорожной одежды, вычисляемого по методике ПНСТ 371–2019 и полученного в результате эксперимента.

¹² ПНСТ 311–2018. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. Введен в действие 25.12.201. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

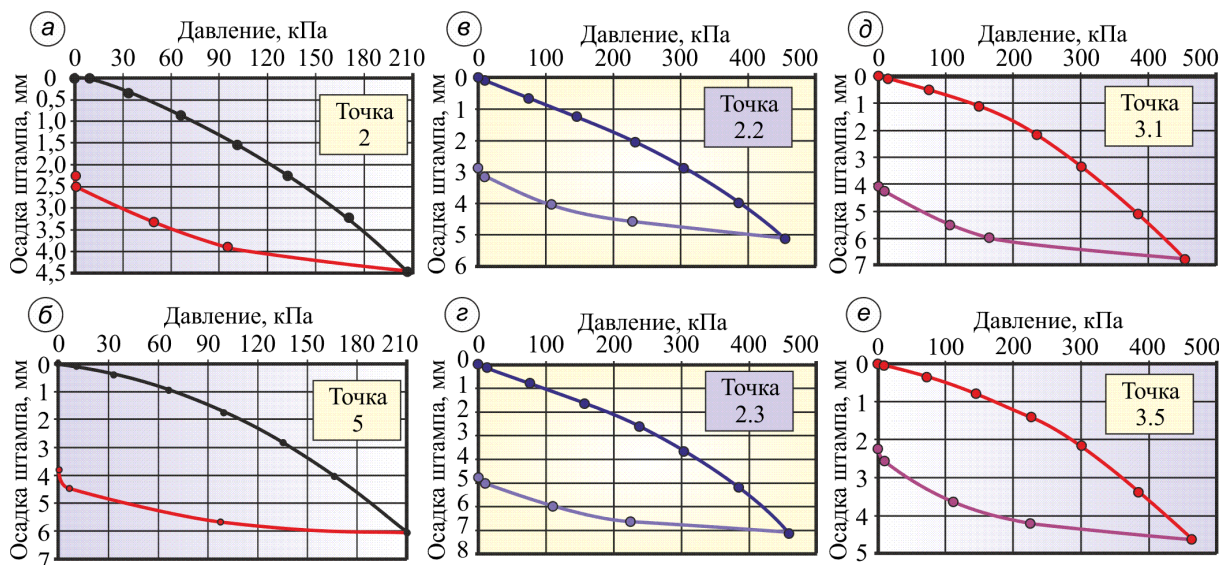


Рисунок 5 – Зависимости осадок земляного полотна и дорожной одежды от давления: а, б – максимальная и минимальная осадки земляного полотна; в, г – максимальная и минимальная осадки грунтощебеночной дорожной одежды с щебнем фракции 20–40 мм; д, е – максимальная и минимальная осадки грунтощебеночной дорожной одежды с щебнем фракции 40–70 мм

Figure 5 – Dependences the settlement of subgrade and road pavement from pressure: a and б – maximum and minimum settlement of the subgrade; в and г – maximum and minimum settlement of soil-crushed-stone road pavement with crushed stone of 20-40 mm fraction; д and е – maximum and minimum settlement of soil-crushed-stone road pavement with crushed stone of fraction 40-70 mm

В таблице 5 приведены данные эксперимента о значениях модулей деформации грунта и дорожных одежд, а также толщины грунтощебеночных слоев в точках испытаний, а в таблице 6 даны результаты расчета модуля деформации грунтощебеночного слоя.

Таблица 5
Результаты эксперимента

Table 5
Experiment results

Сек-ция	Точка измерения	Материал слоя	Толщина слоя, см	Ed, МПа	
				грунта	дорожной одежды
Дорожная одежда с грунтощебеночным слоем с применением щебня фракции 20—40 мм					
3	2.1	Грунтощебень (щебень 60% по объему)	15,6	12,1	22,5
	2.2		15,2	11,7	22,2
2	2.5	Грунтощебень (щебень 50% по объему)	16,0	8,7	18,1
	2.6		15,4	8,7	17,3
1	2.3	Грунтощебень (щебень 40% по объему)	15,0	9,2	16,5
	2.4		15,7	10,2	19,4
Дорожная одежда с грунтощебеночным слоем с применением щебня фракции 40—70 мм					
1	3.1	Грунтощебень (щебень 60% по объему)	15,2	12,1	16,2
	3.2		15,0	11,7	17,1
2	3.3	Грунтощебень (щебень 50% по объему)	15,6	8,7	18,6
	3.4		15,8	8,7	18,9
3	3.5	Грунтощебень (щебень 4 % по объему)	15,5	9,2	24,4
	3.6		16,0	10,2	24,1

Таблица 6
Результаты вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя

Table 6
Results of calculation of the modulus of deformation soil-crushed-stone layer

Фракция щебня, мм	Содержание щебня, %, по объему	Модуль деформации грунтощебеночного слоя, МПа
20–40	40	47,5
	50	70
	60	77,5
40–70	40	43,5
	50	80
	60	90

Модули деформации грунтощебеночного слоя (см. таблицу 6) могут быть использованы в расчете дорожных одежд при условии, что влажность грунта в этом слое равна оптимальной влажности для уплотнения. При других значениях влажности грунта величина модуля деформации грунтощебеночного слоя будет иной. В этом случае значения модулей деформации, представленные в таблице 6, не применимы.

Для ликвидации данного недостатка проведена серия экспериментов по одноосному сжатию грунтощебеночных образцов диаметром 10 см и высотой 20 см. В этих целях сотрудниками кафедры СЭД ФГБОУ ВО «СибАДИ» разработана специальная методика, состоящая из трехосновных этапов: изготовление образцов и подготовки их к испытанию, проведение испытания одноосным сжатием и обработки результатов опыта с применением статистических методов. Образцы высотой 20 см приготавливали, используя две цилиндрические формы прибора стандартного уплотнения. Для испытаний готовили несколько групп образцов. По плану эксперимента влажность грунта в образцах каждой группы должна быть одинаковой, а влажности грунта в образцах разных групп, наоборот, должны отличаться. Соблюдение этого условия обеспечивали тем, что образцы, входящие в одну и ту же группу, насыщали водой в одинаковых условиях в течение одного и того же времени. Образцы других групп увлажнили в течение другого времени. Это позволило обеспечить различную влажность грунта в образцах разных групп. Подготовленные образцы испытывались одноосным сжатием с построением за-

висимости деформации образца от давления. Целью эксперимента являлось вычисление отношения модуля деформации грунтощебеночного образца при произвольной влажности грунта в нем к модулю деформации грунтощебеночного образца при оптимальной влажности грунта в нем. Это отношение названо поправочным коэффициентом к значениям модуля деформации грунтощебеночного и обозначено k_w . Для вычислений коэффициентов k_w использовали расчетные значения модуля деформации грунта при различных влажностях грунта. Вычисление расчетных значений модулей деформации выполнено с использованием методов статистической обработки, которые регламентированы ГОСТ 20522–2012¹³ для грунтов. По величине коэффициентов вариации установлено, что статистическая обработка должна выполняться с применением нормального закона распределения случайной величины. В этом случае применялся весь алгоритм статистической обработки, регламентируемой ГОСТ 20522–2012. Суть такого алгоритма сводится к проверке каждой выборки на наличие грубых ошибок и вычислении расчетных значений случайной величины при предварительном вычислении всех необходимых статистик (среднего значения по выборке, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, показателя точности среднего значения).

Более подробно методику испытаний и статистическую обработку их результатов, примененную для определения коэффициентов k_w , мы поясним в отдельной статье. В настоящей публикации мы приведем расчетные значения коэффициентов k_w , они даны в таблице 7.

¹³ ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введен в действие 01.06.2013. Взамен ГОСТ 20522–96. М.: Стандартинформ, 2013.

Таблица 7
Расчетные значения коэффициентов k_w для вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя при влажности грунта в нем отличной от оптимального для уплотнения значения

Table 7
Calculated values of the k_w coefficients for calculating the modulus of deformation of the gravel layer with soil moisture in it different from the optimal value for compaction

Содержание щебня, %, по объему	Поправка k_w при относительной влажности грунта (W/W_L)					
	0,50	0,55	0,62	0,71	0,80	0,89
40	1,00	0,88	0,68	0,60	0,56	0,54
50	1,00	0,90	0,72	0,66	0,63	0,61
60	1,00	0,92	0,78	0,73	0,71	0,69

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночного слоя и поправок в виде коэффициента k_w можно применять при проектировании дорожных одежд низшего типа. Порядок расчета дорожной одежды должен быть следующий:

1. Определение расчетной относительной влажности грунта W_{cal}/W_L . Для этого применяют общепринятую методику, учитывающую разновидность грунтов, дорожно-климатическую зону и ее подзону, конструктивные особенности дорожной одежды. Таким образом, определение расчетной влажности производится точно так же, как ее расчет при проектировании дорожной одежды типа.

2. Интерполяцией данных таблицы 7 находят величину коэффициента k_w , соответствующую вычисленной расчетной относительной влажности грунта.

3. Вычисляют модуль деформации грунтощебеночного слоя $E_{dw(cal)}$, соответствующий влажности грунта в нем. Это вычисление выполняют по формуле

$$E_{dw(cal)} = k_w \cdot E_{dw(opt)}, \quad (5)$$

где $E_{dw(opt)}$ – модуль деформации грунтощебеночного слоя при оптимальной влажности грунта в нем, МПа.

4. Используя найденное значение модуля деформации грунтощебеночного слоя $E_{dw(cal)}$ и значения толщины слоя, параметров нагрузки и модуля деформации грунта земляного полотна выполняют вычисления общего модуля деформации однослойной дорожной одежды низшего типа.

5. Вычисленное значение общего модуля деформации однослойной дорожной одежды сравнивают с его требуемым значением

$E_{d(required)}$, проверяя выполнение условия прочности, регламентированного ПНСТ 371–2019.

6. Используя представленную последовательность расчета, во всех трех ДКЗ Омской области рассчитаны и отстроены опытные участки. По результатам испытания этих участков будут определены типовые конструкции однослойных дорожных одежд с грунтощебеночным покрытием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Брехман А.И., Ильина О.Н., Трифонов А.А. Органоминеральные смеси на основе нефтяных шламов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1(13). С. 264–267.
- Ilina, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 92(8), 115–126 (2019).
- Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. № 6, Т.17. С. 764–776.
- Лыткин А.А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2017. № 3(55). С. 125–132.
- Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. Materials Science Forum 992, 79–85 (2020).
- Gulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).
- Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).
- Rudgalskiy, D., Chusov, V., Aleksandrov, A.: Strength indices of sand reinforced by foamed

bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).

9. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).

10. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416–1424 (2013).

11. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expensive soil. Arabian Journal of Geosciences 11, 521 (2018).

12. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).

13. FOP Oriola, Moses, G., Sani, J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. Indian Journal of Engineering 14(37), 215–226 (2017).

14. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), Pp. 147–155 (2020).

15. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Строганов В.Ф. Пути повышение эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2013. № 1 (29). С. 52–58.

16. Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А. Оптимизация состава щебеночно-песчаной смеси обработанной портландцементом в комплексе с пластифицирующей и гидрофобизирующей добавкой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 300–305.

17. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. In: 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 640, pp. 1-10. IOP Publishing Ltd (2019).

18. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).

19. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).

20. Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Метод расчета остаточных деформаций,

применяемых в основаниях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2019. № 4(16). С. 456–471.

21. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. International Journal of Pavement Engineering 16(7), 587–601 (2015).

22. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. International Journal of Pavement Engineering 18(3), 236–246 (2017).

23. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Procedia Engineering vol. 143, pp. 300–307 (2016).

24. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. Acta Geophysica 62(5), 1127–1145 (2014).

25. Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л. Анализ причин колебания на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления // Вестник СибАДИ. 2019. № 6(70). С. 718–745.

26. Матвеев С.А., Немировский Ю.В. Свойства упругого слоя основания, армированного объемной георешеткой // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 2(33). С. 24–28.

27. Матвеев С.А., Литвинов Н.Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // Вестник СибАДИ. 2013. № 4(32). С. 57–61.

28. Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // Вестник СибАДИ. 2015. 44(4). С. 80–86.

29. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. Magazine of Civil Engineering 94(2), 21–30 (2020).

30. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. Applied Mechanics and Materials 662, 164–167 (2014).

31. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid Applied Mechanics and Materials 587–589, 1137–1140 (2014).

32. Андреева Е.В. Исследование модулей деформации мерзлого, талого и оттаивающего золошлакового материала для целей рекультивации на примере воркутинской ТЭЦ-2 // Инженерные изыскания. № 13(4). С. 8–15.

33. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог // Техника и технологии строительства. 2015. 1(1). С. 24–31.

34. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Барац Н.И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // Вестник СибАДИ. 2016. № 6 (52). С. 72–79.

35. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 103–110.

36. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натурных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2(21). С. 215–227.
37. Попкова А.В., Попкова А.В. Обоснование модуля упругости земляного полотна из золошлаковой смеси для расчёта дорожных одежд // Техника и технологии строительства. 2017. № 1(9). С. 128–133.
38. Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Результаты исследования золошлаков новосибирской ТЭЦ-3 на предмет применения в качестве материала в дорожном строительстве // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2020. 1(1). С. 62–68.
39. Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Исследование свойств золошлаковых отходов омских ТЭЦ для применения в дорожном строительстве // Вестник МАНЭБ. 2011. № 2(17). 66 с.
40. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологий // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 119–125.
41. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Plate load test of base taken from coal ash and slag mixture in experimental tray and on experimental section of embankment. In: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 451, pp. 1-6. IOP Publishing Ltd (2018).
42. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. Magazine of Civil Engineering 74(6), 3–16 (2017).
43. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Stress distribution in ash and slag mixtures. Magazine of Civil Engineering 86(2), 72–82 (2019). (in Russian)

REFERENCES

1. Brekhman A.I., Il'ina O.N., Trifonov A.A. Organomineral'nye smesi na osnove neftnykh shlamov [Organomineral mixtures based on oil sludge] // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, 13(1): 264-267. (in Russian)
2. Ilina, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 2019 92(8): 115–126.
3. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.YA. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd metodom holodnogo resajklinga [Investigation of the effectiveness of the use of whitewash sludge for the device of monolithic layers of road clothes by cold recycling] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020, 17(6): 764-776. (in Russian)
4. Lytkin A.A. Vliyaniye povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na harakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyah dorozhnykh odezhd [The effect of re-compaction and transport loads on the character of hardening of whitewash sludge in layers of road clothes] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 55(3): 125-132. (in Russian)
5. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. Materials Science Forum 992, 79–85 (2020).
6. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).
7. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).
8. Rudgalskiy, D., Chusov, V., Aleksandrov, A.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).
9. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).
10. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).
11. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expensive soil. Arabian Journal of Geosciences 11, 521 (2018).
12. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).
13. FOP Oriola, Moses, G., Sani, J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. Indian Journal of Engineering 14(37), 215-226 (2017).
14. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), 147–155 (2020).
15. Vdovin E.A., Mavliev L.F., Stroganov V.F. Puti povysheniye effektivnosti ukrepleniya gruntov dlya stroitel'stva dorozhnykh odezhd [Ways to increase the effectiveness of soil strengthening for the construction of road clothes] // *Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013. 29(1): 52-58. (in Russian)
16. Bulanov P.E., Mavliev L.F., Vdovin E.A. Optimizatsiya sostava shchebenochno-peschanoy smesi obrabotannoy portlandcementom v komplekse s plastificiruyushchej i gidrofobiziruyushchej dobavkoj [Optimization of the composition of crushed stone-sand mixture treated with Portland cement in combination with plasticizing and hydrophobizing additive] // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015. 2 (32): 300-305. (in Russian)

17. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. In: 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 640, pp. 1-10. IOP Publishing Ltd (2019).
18. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEast-Con-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).
19. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).
20. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Metod rascheta ostatochnykh deformacij, primenyaemykh v osnovaniyah dorozhnykh odezhd [Method of calculation of residual deformations used in the bases of road clothes] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 68(4): 456-471. (in Russian)
21. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587-601 (2015).
22. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236-246 (2017).
23. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* vol. 143: 300-307 (2016).
24. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. *Acta Geophysica* 62(5), 1127-1145 (2014).
25. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Analiz prichin koleeobrazovaniya na pokrytiyah nezhestkih dorozhnykh odezhd i rekomendacii po umen'sheniyu etogo yavleniya [Analysis of the causes of rutting on the coatings of non-rigid road clothes and recommendations for reducing this phenomenon] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 70(6): 718-745. (in Russian)
26. Matveev S.A., Nemirovskij YU.V. Svoystva uprugogo sloya osnovaniya, armirovannogo ob'yomnoj geosetkoj [Properties of the elastic layer of the base reinforced with a volumetric geogrid] // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*, 2005, 33(2): 24-28.
27. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opredelenie deformacionnykh karakteristik shchebenochno-peschano go osnovaniya, armirovannogo stal'noj geosetkoj [Determination of the deformation characteristics of a crushed-sand foundation reinforced with a steel geogrid] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013, 32(4): 57-61. (in Russian)
28. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoj odezhd [Experimental and theoretical studies of reinforced pavement foundation] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2015, 44(4): 80-86. (in Russian)
29. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 94(2), 21-30 (2020).
30. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 662, 164-167 (2014).
31. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 587-589, 1137-1140 (2014).
32. Andreeva E.V. Issledovanie modulej deformacii merzlogo, talogo i ottaivayushchego zoloshlakovogo materiala dlya celej rekul'tivacii na primere vorkutinskoj TEC-2 [Investigation of deformation modules of frozen, thawed and thawing ash and slag material for reclamation purposes on the example of Vorkuta CHP-2] // *Inzhenernye izyskaniya*, 13(4): 8-15.
33. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Primenenie zoloshlakovykh smesey dlya vertikal'nykh planirovok i stroitel'stva gorodskih dorog [The use of ash and slag mixtures for vertical planning and construction of urban roads] // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2015, 1(1): 24-31.
34. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnykh harakteristik zoloshlakovoj smesi [Experimental studies of the strength characteristics of the ash-slag mixture] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016, 52(6): 72-79. (in Russian)
35. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformacionnykh harakteristik zoloshlakovykh smesey [Results of studies of deformation characteristics of ash and slag mixtures] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 53(1): 103-110. (in Russian)
36. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopostavlenie deformacionnykh parametrov zoloshlakovoj smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Comparison of deformation parameters of ash and slag mixture obtained in laboratory and field conditions] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227. (in Russian)
37. Popkova A.V., Popkova A.V. Obosnovanie modulya uprugosti zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoj smesi dlya raschyota dorozhnykh odezhd [Substantiation of the modulus of elasticity of the roadbed made of ash and slag mixture for the calculation of road clothes] // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2017, 9(1): 128-133. (in Russian)
38. Razuvaev D.A., CHahlov M.G. Rezul'taty issledovaniya zoloshlakov novosibirskoj TEC-3 na predmet primeneniya v kachestve materiala v dorozhnom stroitel'stve [The results of the study of the ash slag of the Novosibirsk CHP-3 for use as a material in road construction] // *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta*, 2020, 1(1): 62-68.

39. Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Issledovanie svoystv zoloshlakovykh othodov omskih TEC dlya primeneniya v dorozhnom stroitel'stve [Investigation of the properties of ash and slag waste from Omsk thermal power plants for use in road construction]// *Vestnik MANEB*, 2011, 17(2): 66. (in Russian)
40. Sirotyuk V.V., Troyan T.P. Vliyanie ugliстых ostatkov na kachestvo zoloshlakov, primenyaemykh dlya stroitel'nykh tekhnologiy [The influence of carbonaceous residues on the quality of ash and slag used for construction technologies]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 58(6): 119-125. (in Russian)
41. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Plate load test of base taken from coal ash and slag mixture in experimental tray and on experimental section of embankment. In: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018), IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, vol. 451, pp. 1-6. IOP Publishing Ltd (2018).
42. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering* 74(6), 3–16 (2017).
43. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering* 86(2), 72–82 (2019).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. Произвел постановку задачи, выполнил разработку методики эксперимента и обработки его результатов, написал текст статьи.

Долгих Г.В. Произвел обработку результатов эксперимента и принял участие в редактировании текста статьи.

Пролыгин А.С. Произвел штамповые испытания и принял участие в строительстве моделей дорожных одежд, рассчитав их толщину, в обработке результатов штамповых испытаний и редактировании текста статьи.

Чусов В.В. Произвел испытания по определению физико-механических грунта и щебня, выполнил лабораторные работы по контролю качества строительства моделей, принял участие в штамповых испытаниях и редактировании текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr S. Prolygin made the statement of the problem, developed the methodology of the experiment and processing its results, wrote the text of the article.

Anatoliy S. Aleksandrov processed the results of the experiment and took part in editing the text of the article.

Gennady V. Dolgikh performed the stamp tests and took part in the construction of road clothes models, calculating their thickness, processing the results of the stamp tests and editing the text of the article.

Vasiliy V. Chusov performed the tests to determine the physical and mechanical soil and crushed stone, performed laboratory work to control the quality of construction of models, took part in stamp tests and editing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57222243670.

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57191531014, ResearcherID: I-8860-2018.

Долгих Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57199391542.

Чусов Василий Владимирович – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 5719153040/57213840332.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Prolygin – Postgraduate student of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57222243670.

Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57191531014, Researcher ID: I-8860-2018.

Gennady V. Dolgikh – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57199391542.

Vasiliy V. Chusov – Teacher of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 5719153040/57213840332.