

Научная статья
УДК 625.7/8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОЩЕБЕНОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ СЖАТИИ

А.С. Пролыгин, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин, Н.П. Александрова
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>
dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>
<https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>
nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является математическое моделирование зависимости секущего модуля деформации от влажности грунта и содержания щебня в грунтощебеночном образце на при одноосном сжатии. Необходимость построения такой математической модели необходима для введения поправочных коэффициентов к значениям штамповых модулей деформации грунтощебеночного слоя, вычисленных по данным испытаний, поставленных при других влажностях грунта, например, при испытаниях в лотке или на дорогах в нерасчетный период года.

Материалы и методы. Для выполнения испытаний при помощи большого прибора стандартного уплотнения изготовлены цилиндрические образцы высотой 20 см и диаметром 10 см. В образцах варьировалось содержание щебня смеси фракций 5–10 и 10–20 мм. Приведены методики насыщения образцов водой и их испытания одноосным сжатием. Изложены правила обработки результатов эксперимента, к которым относится корректировка начальной части графической зависимости деформации от давления и статистическая обработка результатов. Выполнен анализ методов вычисления модуля деформации, которые классифицированы на три вида: секущий модуль, касательный модуль и кусочно-линейный модуль. На основе этого анализа обоснован способ вычисления модуля деформации грунтощебеночного образца при одноосном сжатии.

Результаты. Приведены результаты экспериментального определения деформационных характеристик грунтощебеночных образцов при одноосном сжатии. Получена математическая модель зависимости модуля деформации грунтощебеночного образца от влажности грунта и содержания щебня, применяемых в грунтово-щебеночной смеси.

Обсуждение и заключение. Даны рекомендации по применению результатов исследования для разработки альбома типовых конструкций дорожных одежд низшего типа в районах Омской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дороги с низкой интенсивностью движения, грунтощебеночный материал, модуль деформации

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 04.10.2021; принята к публикации 31.10.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пролыгин А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л., Александрова Н.П. Влияние влажности грунта на деформационные свойства грунтощебеночных образцов при сжатии // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 5(81). С. 614-632. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

© Пролыгин А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л., Александрова Н.П., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF SOIL-CRUSHED STONE SAMPLES DURING COMPRESSION

Aleksandr S. Prolygin, Gennadii V. Dolgikh, Aleksandr L. Kalinin, Natalia P. Alexandrova

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

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

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

<https://orcid.org/0000-0003-0291-2022>

nata26.74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is to determine the dependence of the influence of soil moisture and the content of crushed stone in a soil-crushed stone sample on the secant modulus of deformation under uniaxial compression. The need for such a mathematical model is necessary in order to introduce correction factors to the values of the stamped deformation moduli of the gravel layer calculated from test data delivered at other soil moisture conditions, e.g. for flume or road tests during a non-calculated period of the year.

Materials and methods. Cylindrical samples with a height of 20 cm and a diameter of 10 cm were made to perform tests using a large standard sealing device. The content of crushed stone of a mixture of fractions of 5-10 and 10-20 mm varied in the samples. The methods of saturation of samples with water and their testing by uniaxial compression are given. The rules for processing the experimental results are described, which include: correction of the initial part of the graphical dependence of deformation from pressure and statistical processing of the results. The analysis of methods for calculating the deformation modulus, which are classified into three types, is performed: secant module, tangent module and piecewise linear module. Based on this analysis, a method for calculating the deformation modulus of a soil-crushed stone sample under uniaxial compression is justified.

Results. The results of experimental determination of the deformation characteristics of soil-crushed stone samples under uniaxial compression are presented. A mathematical model of the dependence of the deformation modulus of a soil-crushed stone sample from the soil moisture and the content of crushed stone used in the soil-crushed stone mixture is obtained.

Discussion and conclusions. Recommendations are given on the application of the research results for the development of an album of standard constructions of road pavement of the lowest type in the districts of the Omsk region.

KEYWORDS: roads with low traffic intensity, soil-crushed stone material, modulus of deformation

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 04.10.2021; accepted for publication 31.10.2021.

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., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N. P. Influence of soil moisture on the deformation properties of soil-crushed stone samples during compression. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (5): 614-632. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-614-632>

© Prolygin A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L., Alexandrova N.P., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В дорожном строительстве принято выделять автомобильные дороги с низкой интенсивностью движения (НИД) в отдельную группу. Для этих дорог разрабатываются специальные нормативные документы. Актуальность таких работ обусловлена достаточно большой протяженностью дорог с низкой интенсивностью движения в составе сети дорог разных стран. Например, в США протяженность дорог с низкой интенсивностью движения оценивается почти в 80% от протяженности общей сети. В Швеции и Финляндии протяженность таких дорог в общей сети составляет до 60 и 70% соответственно. В Российской Федерации дороги с низкой интенсивностью движения имеют протяженность, составляющую более 70% общей протяженности автомобильных дорог. Таким образом, в России протяженность дорог с низкой интенсивностью дороги большая, но такие дороги выделены в отдельную группу дорог только в 2011¹ г. В 2015 г. введены в действие строительные правила², регламентирующие методику проектирование дорог с НИД, а в 2019 и 2020 гг. вышли в свет ПНСТ³ и ГОСТ⁴, устанавливающие правила конструирования и расчета дорожных одежд переходного и низшего типов для дорог с НИД. Появление этих стандартов завершает процесс разделения методов проектирования дорожных одежд на две группы: традиционные – для дорог общего

пользования и методы для дорог с НИД, основанные на новом методе расчета по глубине колеи и расчете по модулю деформации, созданном группой Н.Н. Иванова и применявшемся в первой инструкции ВСН 46-60.

Раздел конструирования дорожных одежд для дорог с НИД, регламентируемый ПНСТ 371-2019, содержит указания по применению в конструкциях местных материалов. Различные регионы РФ обладают разными местными материалами. В связи с этим специалисты разных регионов РФ выполняют исследования по применению разных материалов, характерных для конкретного региона, в конструкциях одежд низшего и переходного типа. Примером таких исследований являются документы, разработанные научными группами: ВолГАСУ (руководитель С.В. Алексикова)^{5,6}, ЗАО «Транспроект» (с привлечением специалистов КазГАСУ и МАДИ В.А. Вдовина и Д.М. Немчинова)⁷, СибАДИ и КУ УДХ Омской области (основные исполнители и консультанты В.В. Сиротюк, Г.В. Долгих, А.С. Александров, Д.Х. Курманов, А.Г. Зверев)⁸.

В решении проблемы конструирования дорожных одежд для дорог с НИД специалисты практики и научные работники в области строительства дорог идут путем, проторенным специалистами дорожных департаментов и вузов США, выполняя работы в виде науч-

¹. ОДМ 218.2.017-2011. Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог с низкой интенсивностью. Введен в действие 13.07.2012. Введен впервые. М.: ФГУП «РОСДОРНИИ», 2012.

². СП 243.1326000.2015. Проектирование и строительство автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения. Введен в действие 01.12.2015. М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2015.

³. ПНСТ 371-2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожные одежды. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

⁴. 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.

⁵. СТО.25106343.02-2014. РМД Проектирование дорожных одежд низшего типа с использованием материалов прирассовых карьеров. Региональный методический документ. Махачкала, 2015.

⁶. Региональный дорожный документ. РДМ 218/34.1.001-2002 Основание дорожной одежды из грунта повышенной плотности. Волгоград, 2003.

⁷. СТО 4800-001-57253637-2011. Проектирование сельских дорог в республике Татарстан. Казань: ГУ Главтатдортранс, 2011. 21 с.

⁸. СТО 03709897-001-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование, строительство, капитальный ремонт и ремонт дорожных одежд низшего типа. Введен в действие 31.05.2021. Омск, 2021. 72 с.

но-технических отчетов^{9,10,11,12} с публикацией новых материалов в статьях [1, 2, 3, 4, 5]. В вузах РФ выполняются исследования в аналогичных направлениях.

Актуальность таких работ и применение полученных в них результатов в практике проектирования дорожных одежд для дорог с НИД Омской области подтверждается данными территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Омской области. Согласно этим данным общая протяженность дорог в Омском регионе составляет 25212,5 км, в том числе 23878,4 км дорог общего пользования и 1334,1 дорог необщего пользования. Протяженность дорог общего пользования складывается из протяженности федеральных дорог, дорог регионального или межмуниципального значения и дорог местного значения. Протяженность федеральных дорог составляет 729,5 км, дорог регионального или межмуниципального значения – 10200,1 км, а дорог местного значения – 12948,8 км. К дорогам с низкой интенсивностью движения относятся все дороги местного значения и часть дорог межмуниципального значения с интенсивностью движения менее 400 авт./сут. На протяжении более 10000 км такие дороги имеют грунтовую поверхность, для них остро необходима постройка экономичных дорожных одежд.

В ФГБОУ ВО «СибАДИ» силами трех кафедр: «Проектирование дорог», «Строительство и эксплуатация дорог», «Мосты и тоннели» выполнена большая работа по исследованию физико-механических свойств, параметров прочности и деформируемости, гранулометрического состава техногенных грунтов и отходов промышленности. Изучены свойства геотекстилей, плоских и объемных георешеток. Разработаны методики расчета дорожных одежд с такими материалами. В числе этих многочисленных работ отметим исследования:

- золоминеральных смесей и зол уноса [6, 7, 8, 9, 10];
- белитового шлама [11, 12, 13];
- геосинтетических материалов [14, 15, 16, 17, 18, 19];
- модификации условий пластичности [20, 21];
- теоретические [22] и экспериментальные работы [23, 24] по определению напряжений в земляном полотне и слоях конечной толщины;
- совершенствование расчетов дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу [25, 26, 27] и накоплению остаточных деформаций [28].

Анализ работ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19] показывает, что для применения отходов промышленности в дорожных одеждах необходимо выполнение большого количества экспериментальных работ. Такие исследования требуют затрат времени, а значит, внедрение технических решений не может быть быстрым. Поэтому возникает задача разработки конструкций дорожных одежд из местных материалов. Сложность задачи заключается в отсутствии в Омском регионе месторождений горных пород, поэтому щебень, щебеночно-песчаные и песчано-гравийные смеси привозят из Уральского региона России и республики Казахстан. Затраты на транспортировку зернистых материалов велики.

В качестве альтернативы щебеночным материалам в дорожных одеждах применяют грунты, укрепленные или стабилизированные вяжущими и полимерными материалами [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]. В целях экономии щебня его тоже укрепляют вяжущими материалами, повышая прочность и понижая деформируемость, что позволяет уменьшить толщину слоя в дорожной одежде. В этих же целях щебеночные основания дорожных одежд армируют геосинтетическими материалами [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]. Преимущество укрепленных грунтов и зернистых материалов перед традиционными щебеночными материалами состоит в снижении остаточных

⁹ White D.J. et al. Fly Ash Soil Stabilization for NonUniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa. 2005.

¹⁰ Hoover J.M., et al. Performance of randomly oriented, fiber-reinforced roadway soils: A laboratory and field investigation. Iowa Highway Research Board Project HR-211, Engineering Research Institute, Iowa State University, Ames, Iowa. 1982.

¹¹ White D.J. et al. Mechanical Stabilization of Subgrade Layer. Tech Brief, Boone County Expo Test Sections, Boone County Expo, Iowa Department of Transportation, Ames, Iowa. 2013..

¹² Jobgen M.C. et al. Low cost techniques of base stabilization. Project HR-312, Iowa Department of Transportation, Ames, Iowa. 1994.

деформаций, возникающих от повторных нагрузок. Авторы работ [47, 48, 49, 50] сообщают, что зернистые материалы склонны к накоплению остаточных деформаций при возникновении сравнительно малых девиаторов σ_d , величина которых определяется разностью максимального и минимального главных напряжений. Кроме того, грунты и зернистые материалы обладают сравнительно невысокими характеристиками сопротивления сдвигу [51, 52]. Это может стать причиной формирования колеи типа I и типа II [53, 54, 55, 56, 57], которые возникают в результате деформаций сдвига либо в покрытии из гранулированного материала (колея типа I), либо грунта в земляном полотне (колея типа II).

ПНСТ 371-2019 регламентирует выполнять расчет дорожной одежды для автомобильной дороги с НИД по двум критериям. Первый критерий состоит в расчете по прочности, целью которого является обеспечение на поверхности дорожной одежды общего модуля деформации, величина которого не должна быть меньше требуемого значения, но и не превышать требуемое значение более чем на 10%. Второй критерий допускает образование колеи, глубина которой не должна превышать предельного значения. Для обоих расчетов необходимо использовать модуль деформации материала слоя.

В настоящее время выполняются экспериментальные работы по определению модулей деформации различных материалов. Целью данной статьи является исследование зависимости модуля деформации грунтощебеночного образца от дозировки щебня и влажности грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение значений деформационных характеристик грунтов и зернистых материалов лабораторными испытаниями производят одним из четырех способов, к которым относят методы: одноосного, трехосного и компрессионного сжатия, а также метод одноплоскостного среза. Каждый из этих методов позволяет определить определенные деформационные характеристики, например, продольный, поперечный или объемный модуль деформации, коэффициент Пуассона. Перечисленные параметры материала подобны его упругим характеристикам, но отличаются тем, что ха-

рактеризуют упругопластическую деформацию. Поэтому при лабораторных испытаниях достаточно определить только одну пару упругопластических постоянных, например, продольный модуль деформации и коэффициент Пуассона. По этим двум значениям можно вычислить любую из трех других деформационных характеристик: объемный и поперечный модуль деформации, постоянную Ламе. Для таких вычислений применяют классические зависимости.

Рассматривая методы лабораторных испытаний, отметим, что при компрессионных испытаниях деформации поперечного расширения образца отсутствуют, то есть равны нулю. В реальных условиях работы грунты земляного полотна и зернистые материалы слоев дорожной одежды испытывают трехосное сжатие с определенной степенью стеснения деформаций бокового расширения. Наименьшие боковые деформации грунта возникают в области массива, расположенной под штампом. С глубиной деформации бокового расширения увеличиваются и теоретически на глубине равной бесконечности достигают значений, характерных для одноосного сжатия. Таким образом, трехосные испытания самым лучшим образом соответствуют реальным условиям работы грунтов и зернистых материалов. Но для выполнения таких испытаний с грунтощебеночными материалами требуются специальные приборы трехосного сжатия, позволяющие испытывать образцы больших размеров. Приготовление таких образцов имеет свои особенности, состоящие в том, что формовку образца выполняют удалением воздуха из пор при помощи системы вакуумирования. В этом случае при больших размерах образца возникает сложность с определением его массы и плотности сухого грунта. В результате нет возможности оценить достаточность уплотнения зернистого материала в образце.

На рисунке 1 приведены фрагменты трехосных испытаний, выполненных А. Мирным в лаборатории МГСУ¹³. На рисунке 1, а представлен общий вид установки трехосного сжатия, предназначенной для испытания цилиндрических образцов из крупнообломочного грунта диаметром 30 см и высотой 60 см. Установка снабжена камерой трехосного сжатия, компьютером с программным обеспечением, позволяющим проводить необходимое

¹³ Иллюстрации испытаний подготовлены при помощи функции prt sc с обучающего видеофильма «Установка трехосного сжатия для испытания крупнообломочных грунтов», находящегося в открытом доступе на канале YouTube.



Рисунок 1 – Трехосные испытания крупнообломочного грунта в лаборатории МГСУ при помощи прибора конструкции НПО «Геотек»:
 а – общий вид прибора; б – натягивание эластичной оболочки на нижний штамп;
 в – установка частей цилиндрической обоймы; г – укладка фильтровальной бумаги;
 д – послойная засыпка и ручное уплотнение грунта; е – укладка верхней фильтровальной бумаги;
 ж – установка верхнего фильтрующего диска; з – установка верхнего штампа;
 и – крепление эластичной оболочки; к – подключение системы вакуумирования; л – демонтаж обоймы;
 м – проверка сохранения образцом формы; н – установка камеры трехосного сжатия;
 о – управление испытанием при помощи компьютера

Figure 1 – Three-axis tests of large-grained soil in the laboratory of the Moscow State University with the aid of the device of the NGO «Geotek»:
 а – general view of the instrument; б – stretching of the elastic envelope on the lower stamp;
 в – installation of parts of the cylindrical casing; г – laying of filter paper; д – layer filling and manual compaction;
 е – top laying; ж – installation of the top filter disk; з – installation of the top stamp;
 и – fixation of the elastic envelope; к – connection of the vacuum system; л – dismantling of the clip;
 м – verification of the shape retention of the sample; н – installation of the three-axis compression chamber;
 о – test management by computer

испытание и обрабатывать его результаты. В комплект установки входят: нижний и верхний штампы, к каждому из которых прилагается фильтрующий диск и круг фильтровальной бумаги; эластичная оболочка; цилиндрическая обойма, состоящая из двух частей; система вакуумирования, снабженная шлангами для откачки воздуха из пор грунта, размещенного в оболочке и обойме; резиновые кольца и металлические хомуты, предназначенные для закрепления оболочки на нижнем и верхнем штампах; датчики давления в камере и вертикальных перемещений. Применение системы вакуумирования позволяет откачать воздух из пор образца за несколько минут. Готовность образца к испытанию определяют визуально, проверяя, держит ли образец форму. Если образец не меняет форму, то обе части обоймы снимают, а на образец устанавливают камеру трехосного сжатия, закрепляя ее болтами на нижнем штампе, то есть качество уплотнения материала оценивается визуально.

В нашей грунтовой лаборатории имеются приборы трехосного сжатия, позволяющие испытывать образцы диаметром 5 см и высотой 10 см. В этом случае размер скелетной добавки щебня необходимо ограничить фракцией 4–8 мм. Малые размеры образца позволяют определить его массу и контролировать плотность, а также коэффициент уплотнения грунтощебня, применяя для определения максимальной плотности материала метод Проктора. Но возникает другая проблема, она связана с несоответствием зернового состава образца гранулометрическому составу смесей, применяемых в дорожном строительстве. В образце отсутствует каркасная фракция.

Кроме того, значения модулей деформации, полученные по данным трехосных испытаний, вычисляют либо по отношению приращений максимального главного напряжения к соответствующим приращениям вертикальной деформации образца, либо отношением приращений девиатора напряжений к соответствующим приращениям деформации. Выбор того или иного способа обуславливается математической моделью, связывающей модуль деформации с характеристикой напряженного состояния, которой могут быть главные напря-

жения или девиатор. Штамповой модуль деформации зависит от размеров штампа и соответствующих приращений давления и осадки. Поэтому вычисление штамповой модуль деформации через значение этого параметра, полученного по данным трехосных испытаний, требует ввода специальных коэффициентов. Эти коэффициенты подобны коэффициентам Агишева, применяемым для вычисления штамповой модуль деформации по данным компрессионных испытаний. Подобные коэффициенты можно ввести при расчете модуль деформации через значение этого параметра, полученные на основе испытаний по одноосному сжатию.

Сравнивая виды сжатия: гидростатическое, компрессионное, трехосное с ограниченным боковым расширением образца и одноосное, можно прийти к выводу, что одноосный эксперимент создают наихудшие условия работы образца. Для таких экспериментов возможно создание образцов диаметром 10 см и высотой 20 см. В этом случае, по сравнению с образцами, приготавливаемыми для трехосных испытаний, можно использовать более крупные фракции щебня. Размеры образца для одноосного сжатия позволяют определить его плотность, а затем и коэффициент уплотнения, используя метод Р. Проктора для определения максимальной плотности. Поэтому, взвесив недостатки всех методов, в наших исследованиях использован метод одноосного сжатия.

Для таких испытаний изготавливались образцы цилиндрической формы высотой 20 см и диаметром 10 см. Диаметр образца определил максимальный размер зерен щебня, используемого при изготовлении образца. Для изготовления образца применен щебень из смеси фракций 5–10 и 10–20 мм. Отдельными лабораторными испытаниями определены все контролируемые параметры щебня, на основе чего установлено, что щебень соответствует требованиям ГОСТ 8267–93¹⁴. В качестве грунта, применяемого для изготовления образцов, взят суглинок тяжелый пылеватый. Классификация грунта выполнена по ГОСТ 25100–2020¹⁵ на основе данных лабораторных испытаний по определению влажностей на границах текучести и раскатывания (по

¹⁴. 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.

¹⁵. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Введен в действие 01.01.2021. Взамен ГОСТ 25100–2011. М.: Стандартинформ, 2020.

ГОСТ 5180–2015¹⁶), а также зернового состава (ГОСТ 12536–2014¹⁷). Максимальная плотность и оптимальная влажность определены испытанием по стандартному уплотнению (по ГОСТ 22733–2016¹⁸). Максимальная плотность грунта составила 1,69 г/см³, а оптимальная влажность 18,3%.

Высота образца 20 см обусловлена общими требованиями к испытанию цилиндрических грунтовых образцов. Как правило, для испытаний применяют образцы с соотношением высоты к диаметру, равному 2. Поэтому при диаметре образца 10 см его высота должна быть 20 см. Учитывая необходимую высоту образцов 20 см, при их изготовлении применяли две цилиндрические разъемные формы от двух одинаковых приборов. Для создания условий трамбовки грунта аналогичных условиям при стандартном уплотнении в большом приборе необходимо увеличить число уплотняемых слоев. При изготовлении образца в большом приборе стандартного уплотнения учитывали, что при применении методики, регламентируемой ГОСТ 22733–2016, изготовление образца высотой 10 см выполняется трамбовкой трех слоев грунта. Следовательно, для изготовления образца высотой 20 см по методике стандарта РФ необходимо трамбовать шесть слоев. Количество ударов по каждому слою приняли стандартным, то есть по 40 ударов на слой. По завершении уплотнения каждого слоя, за исключением верхнего шестого слоя, на поверхности каждого слоя ножом наносили насечки. Это позволяло обеспечить сцепление слоев в образце. После уплотнения верхнего слоя дополнительную насадку снимали и, срезая лишний грунт, выравняли поверхность образца вровень с верхней кромкой второй разъемной формы. Методика эксперимента предполагала варьирование влажности суглинка тяжелого в образцах грунтощебня. Для этого образцы, изготовленные при оптимальной влажности суглинка 18,3% и щебня 4,8%, увлажняли. Увлажнение образцов выполняли подводом воды к нижней части образца, используя капиллярный подъем. Для этого нижняя часть образца оборачивалась фильтровальной бумагой, которая крепилась при помощи канцелярских

резинок. Образец помещали в сосуд с водой так, чтобы верхняя кромка воды не превышала уровень фильтровальной бумаги. Фильтровальная бумага предотвращала вымывание частиц грунта из образца. Водонасыщение образца за счет капиллярного поднятия воды выполняли с разным временем для различных групп образцов. Это позволяло получить группы образцов с различной влажностью грунта. Перед проведением испытания на одноосное сжатие образцы извлекали из сосуда с водой и освобождали от фильтровальной бумаги. На рисунке 2 приведены основные этапы изготовления образца.

После водонасыщения, для более равномерного распределения влаги по порам грунтощебеночного материала, образцы выдерживали в эксикаторах, закрытых крышкой в течение суток.

Для выполнения испытаний применен измерительно-вычислительный комплекс, в состав которого входят: разрывная машина и компьютер с программным обеспечением, управляющий испытанием. Непосредственно перед выполнением испытания производили измерение геометрических размеров образца: высоты и диаметра, данные о которых оператор вносил в программу испытаний.

Грунтощебеночный образец размещали на основании разрывной машины и прикладывали сжимающую нагрузку со скоростью 3 мм/мин. Испытание выполняли либо до разрушения образца, либо до достижения деформацией образца предельного значения. Предельное значение деформации принято 15%, его задавали в программе испытаний. Такая предельная деформация обеспечивает линейное деформирование образцов с высокой влажностью грунта на начальном этапе приложения нагрузки и нелинейное деформирование на втором этапе. Испытание выполнялось в автоматическом режиме. В качестве результатов испытаний программа выполняет построение зависимости деформаций образца от давления и приводит данные о максимальной деформации образца и максимальном давлении, которое выдержал образец при максимальной деформации.

¹⁶ ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введен в действие 01.04.2016. Взамен ГОСТ 5180–84. М.: Стандартинформ, 2019.

¹⁷ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019.

¹⁸ ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Введен в действие 01.01.2017. Взамен ГОСТ 22733–2002. М.: Стандартинформ, 2019.



Рисунок 2 – Подготовка образца к испытанию: а – подача грунтощебеночного материала в цилиндрическую форму; б – трамбовка материала; в – устройство насечек на уплотненной поверхности; г – разбор цилиндрических форм; д – образец с фильтровальной бумагой, подготовленный для насыщения водой; е – освобождение образца от бумаги; ж – образец, подготовленный к испытанию

Figure 2 – Sample preparation for testing: а – innings soil-crushed-stone materials into a cylindrical form for compaction of the first layer; б – ramming of material; в – notching the compacted surface; г – parsing of cylindrical forms; д – sample with filter paper prepared for capillary saturation with water; е – freeing the sample from paper; ж – sample prepared for testing

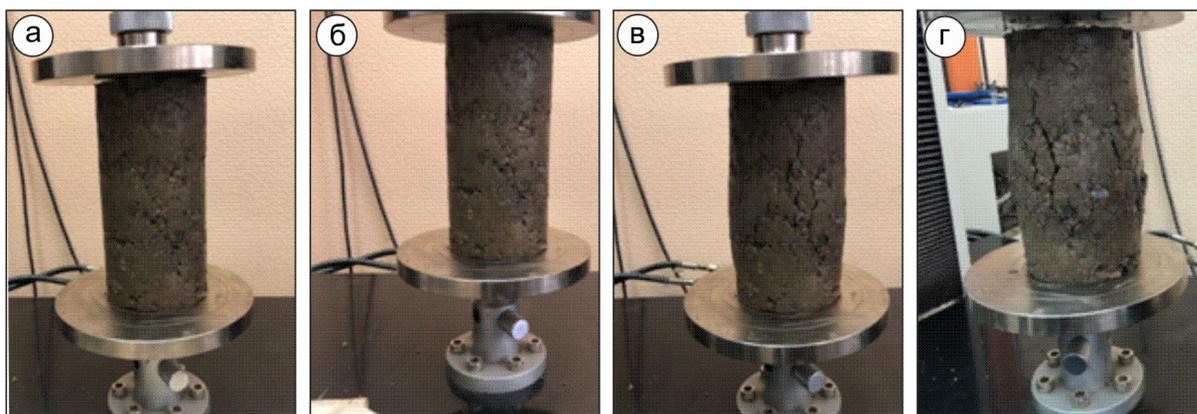


Рисунок 3 – Иллюстрации строительства и испытания модели земляного полотна: а – образец помещен на основание разрывной машины; б – начало испытания; в – появление трещин при деформировании образца; г – завершённое испытание по достижению предельной деформации

Figure 3 – Illustrations of construction and testing of a model of subgrade: а – the sample is placed on the base of the tensile testing machine; б – start of test; в – appearance of cracks during deformation of the sample; г – completed test at reach ultimate deformation

Произведено испытание шести групп образцов, в каждой из которых влажность суглинка в грунтощебеночных образцах была одинакова, но отличалась от влажностей образцов в других группах. Иллюстрации испытаний приведены на рисунке 3.

Для вычисления модуля деформации применялась скорректированная зависимость вертикальной деформации образца от давления. Для корректировки этой зависимости использован метод, регламентируемый стандартами ASTM D1883-2016¹⁹, AASHTO T 193-

¹⁹ ASTM D1883-2016 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.

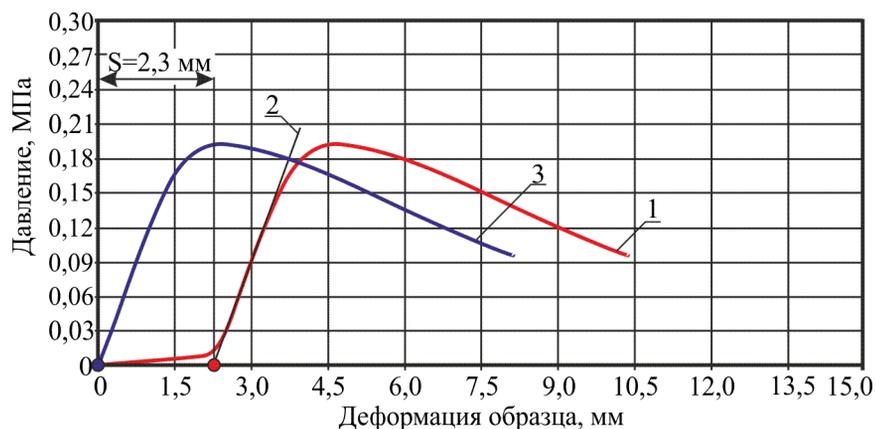


Рисунок 4 – Графическая иллюстрация пояснений по корректировке зависимости осадки образца от давления:
 1 – фактическая нескорректированная зависимость;
 2 – прямая необходимая для корректировки;
 3 – скорректированная зависимость осадки образца от давления

Figure 4 – Graphical illustration of explanations for correcting the dependence of sample settlement from pressure: 1 – actual unadjusted dependence; 2 – straight line required for adjustment; 3 – corrected dependence of sample settlement from pressure

13 (2021)²⁰, при определении калифорнийского числа несущей способности грунта. Этот же метод реализован в ПНСТ 323-2019, являющимся российским аналогом стандартов США.

Суть корректировки зависимости деформации образца от давления показана на рисунке 4.

Характерной особенностью кривой 1, отображающей зависимость деформации образца от давления, является наличие вогнутого начального участка. Наличие такого вогнутого участка в начале деформирования характерно для большинства из испытанных нами образцов. Вогнутость начального участка обуславливается неровностью поверхности образца и отсутствием надежного контакта по всей контактной площади плунжера с образцом. Вогнутую часть графика использовать нельзя, она должна быть скорректирована.

Для корректировки кривой 1, показанной на рисунке 4, на ней выбирается прямолинейный участок, по точкам которого проводится прямая 2. Пересечение этой прямой, обозначенной на рисунке 4 номером 2, с осью деформации дает точку, а расстояние от этой точки до начала координат позволяет вычислить величину поправки S . Из данных рисунка 4 сле-

дует, что значение поправки S составляет 2,3 мм. Величина найденной поправки вычитается из значений деформаций фактической нескорректированной зависимости, а найденные разности являются деформациями скорректированной зависимости, обозначенной на рисунке 4 цифрой 3. Таким образом, при построении скорректированной зависимости нужно для каждого значения давления определить соответствующую ему величину деформации для нескорректированной зависимости и вычесть из нее величину поправки, получив скорректированную величину деформации. Следовательно, при корректировке данных испытаний значения давлений одинаковы для нескорректированной и скорректированной зависимости, а деформации образца для этих зависимостей различны.

По скорректированной зависимости деформации от давления вычисляли модуль деформации грунтощебеночного материала. Для этого рассматривали возможность определения секущего, касательного и кусочно-линейного нелинейного модуля. Схемы, поясняющие определение этих модулей, показаны на рисунке 5.

²⁰ AASHTO T 193-13 (2021). Standard Method of Test for The California Bearing Ratio

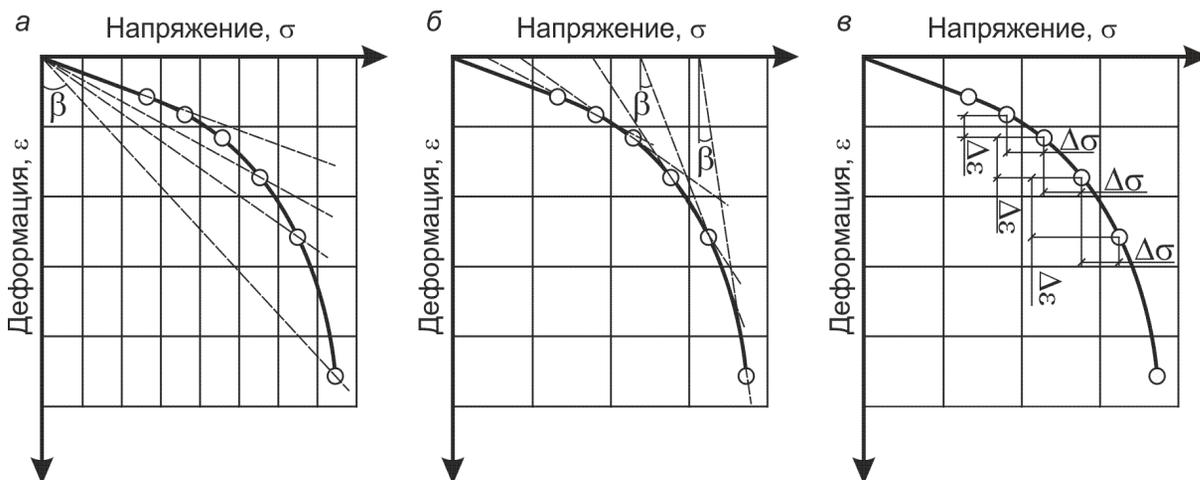


Рисунок 5 – Диаграммы сжатия: а, б, в – схемы определения секущего, касательного и кусочно-линейного модуля

Figure 5 – Compression diagrams: a, b and c – schemes for determining the secant, tangent and piecewise linear modulus

Секущий модуль деформации определяется арктангенсом угла (β), показанного на рисунке 5, а, то есть $E = \text{arc tg } \beta$. Для определения касательного модуля деформации к выбранной на графике точке нужно провести касательную, как это показано на рисунке 5, б. После этого касательный модуль определяется по аналогии с секущим модулем, то есть арктангенсом угла (β). При вычислении кусочно-линейного модуля используют приращения деформаций $\Delta \epsilon$ и напряжений $\Delta \sigma$ от двух последовательно приложенных нагрузок, а модуль определяют отношением $E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$. Схема определения приращений приведена на рисунке 5, в. Результаты определения кусочно-линейного модуля можно интерпретировать как нелинейный модуль. На рисунке 5, а; 5, б; и 5, в приведены характерные пределы напряжений, предел пропорциональности R_{pr} и предел прочности R_c . Предел пропорциональности характеризует наибольшую величину напряжения, при которой сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. В пределах этой линейной зависимости деформации являются упругопластическими, а не упругими как у монолитных материалов. Следовательно, секущий модуль, определенный для напряжения или давления, величина которого соответствует пределу пропорциональности, имеет максимальное из всех значений, принимаемых модулем деформации в пределах кривой деформирования. Этот модуль соответствует линейной зависимости осадки от давления, постулируемой в

нормативном методе расчета дорожной одежды. Поэтому именно этот модуль был нами принят при обработке экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 6 представлен пример определения секущего модуля деформации для одного из испытанных образцов.

Для определения секущего модуля деформации на графике, отображающей зависимость относительной деформации от давления на образец, необходимо провести прямую, соединяющую начало координат с интересующей точкой на графике. В качестве такой точки нами выбрана точка, ограничивающая стадию линейных деформаций, то есть участок кривой, на котором зависимость деформации от давления линейная. Далее для выбранной точки определяют давление и соответствующую этому давлению общую относительную деформацию. Согласно данным, представленным на рисунке 6, выбранной на графике точке соответствует давление 0,135 МПа и относительная деформация 0,0059. Секущий модуль деформации находят отношением давления к деформации в выбранной точке. Таким образом, модуль деформации составил 22,9 МПа. Отметим, что этот модуль деформации получен при испытании грунтощебеночного образца с содержанием щебня 50% по объему смеси и при оптимальной влажности грунта в образце.

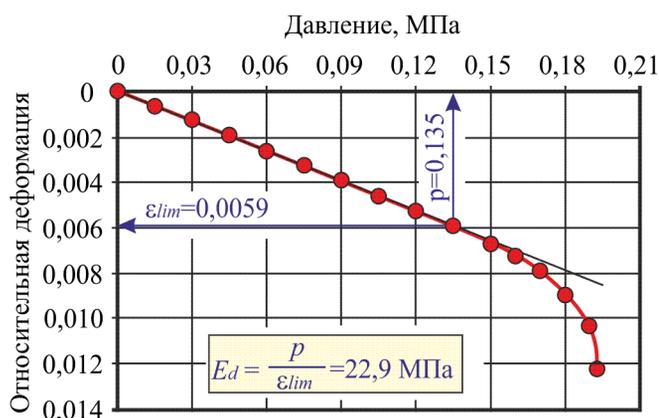


Рисунок 6 – Вычисление секущего модуля деформации

Figure 6 – Calculation of the secant deformation modulus

Таблица 1
Секущие модули деформации грунтощебеночных образцов

Table 1
Secant modulus of deformation of soil-crushed-stone samples

Содержание щебня, % по объему	Номер опыта	Модуль деформации грунтощебня, МПа в зависимости от влажности суглинки в образце, %					
		18,3	20,1	22,8	26,1	29,4	32,6
40	1	15,2	13,0	9,9	8,6	8,2	7,3
	2	13,8	11,9	9,8	8,8	8,3	8,0
	3	14,6	12,7	9,2	8,9	8,5	7,8
	4	13,5	12,8	9,4	8,3	8,1	8,2
	5	14,4	12,1	10,1	9,1	7,6	7,5
	6	14,8	13,4	10,3	8,1	7,7	7,9
50	1	20,3	19,3	16,5	14,1	13,9	13,0
	2	19,7	18,7	15,0	15,1	12,4	12,0
	3	22,9	20,6	14,6	13,4	13,1	12,4
	4	21,4	18,3	15,9	13,7	12,8	12,7
	5	22,1	19,9	14,2	13,0	13,5	13,1
	6	20,8	17,7	15,4	14,6	14,4	14,0
60	1	24,2	22,1	20,1	16,9	16,4	17,9
	2	25,8	23,9	18,9	17,5	17,0	17,5
	3	26,0	23,7	19,8	18,5	18,0	16,6
	4	23,1	21,3	20,3	17,7	17,2	16,7
	5	24,0	22,3	18,7	18,8	18,3	15,9
	6	25,4	23,4	18,0	19,0	18,5	17,8

В таблице 1 приведены частные значения секущих модулей деформации, вычисленных по результатам испытания грунтощебеночных образцов.

Выборки частных значений модулей деформации проверены на наличие грубых ошибок по правилам, регламентируемым ГОСТ 20522–2012²¹. Установлено, что выборки не

²¹. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введен в действие 01.07.2013. Взамен ГОСТ 20522–96. М.: Стандартинформ, 2013.

Таблица 2
Результаты вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя

Table 2
The results of calculating the deformation modulus of the soil-crushed-stone layer

Содержание щебня, % по объему	Наименование статистики 18,3	Величина статистики в зависимости от влажности суглинка в образце, %					
		20,1	22,8	26,1	29,4	32,6	
40	Среднее значение, МПа	14,4	12,7	9,8	8,6	8,1	7,8
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	0,63	0,56	0,42	0,38	0,35	0,33
	Коэффициент вариации, %	4,4	4,5	4,3	4,4	4,4	4,3
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	13,7	12,1	9,3	8,2	7,7
максимальное		15,0	13,2	10,2	9,0	8,4	8,1
50	Среднее значение, МПа	21,2	19,1	15,3	14,0	13,4	12,9
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	1,18	1,07	0,85	0,78	0,74	0,69
	Коэффициент вариации, %	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5	5,3
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	20,0	18,0	14,4	13,2	12,6
максимальное		22,4	20,2	16,2	14,8	14,1	13,6
60	Среднее значение, МПа	24,8	22,8	19,3	18,1	17,6	17,1
	Среднеквадратическое отклонение, МПа	1,16	1,04	0,91	0,83	0,83	0,79
	Коэффициент вариации, %	4,7	4,5	4,7	4,6	4,7	4,6
	Коэффициент t_a	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
	Расчетное значение	минимальное	23,5	21,7	18,3	17,2	16,7
максимальное		26,0	23,9	20,3	18,9	18,4	17,9

содержат грубых ошибок, вследствие чего отсеивания частных значений из выборок не требуется. После проверки на наличие грубых ошибок выборки модулей деформации обработаны методами математической статистики с применением нормального закона распределения случайной величины, в соответствии с требованиями ГОСТ 20522–2012 при двусторонней доверительной вероятности 0,95. Результаты статической обработки, а именно вычисления среднего значения, расчетных значений модуля деформации и все необходимые для этих вычислений математические статистики приведены в таблице 2.

Для математического моделирования вычислены относительные влажности грунта, применяемого в грунтово-щебеночной смеси, они рассчитаны отношением влажностей грунта, представленных в таблицах 1, 2, к влажности на границе текучести. Влажность на границе текучести определена предварительными испытаниями суглинка тяжелого, она составляет 36,6%. Также вычислены относительные значе-

ния модуля деформации. Эти значения определены отношением модулей деформации, полученных для каждой влажности, к модулям деформации, полученным при оптимальной влажности грунта в образце, то есть при влажности 18,3%. Относительные значения модуля деформации показывают, во сколько раз модуль деформации грунтощебеночного материала при естественной влажности грунта в нем меньше модуля деформации этого материала при оптимальной влажности грунта. Поэтому эти относительные значения можно использовать в качестве поправок к модулям деформации грунтощебеночного материала с оптимальной влажностью грунта в нем, вычисленным по результатам штамповых испытаний. Значения поправок приведены в таблице 3.

При аппроксимации полиномом третьей степени расчет поправки k_w выполняется по формуле

$$k_w = b_0 + b_1 \cdot \frac{w}{w_T} + b_2 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^2 + b_3 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^3, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 , b_2 и b_3 – постоянные коэффициенты многочлена третьей степени, зависящие от содержания щебня.

В таблице 4 приведены значения постоянных коэффициентов полинома третьей степени (1) и величина коэффициента детерминации для каждой математической модели.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что для расчета постоянных коэффициентов полинома третьей степени (1) можно подобрать эмпирические формулы, связывающие значения этих коэффициентов с содержанием щебня по объему. Такие эмпирические формулы приведены в таблице 5.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночных образцов позволили определить поправочные коэффициенты k_w .

Для вычисления значения коэффициента разработана математическая модель, связывающая этот коэффициент с относительной влажностью связного грунта, применяемого в грунтощебеночной смеси, и содержанием в ней щебня смеси при проектировании дорожных одежд низшего типа. В результате появляется возможность вычисления модуля деформации грунтощебеночного материала в конструктивном слое дорожной одежды при любой относительной влажности, применяемого связного грунта, путем вычисления простого произведения

$$E_{dw(cal)} = k_w \cdot E_{dw(opt)}. \quad (2)$$

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночного материала можно использовать при проектировании конструкций дорожных одежд на опытных участках.

Таблица 3
Поправки к значениям модуля деформации грунтощебня k_w на относительную влажность грунта в нем

Table 3
Corrections to the values of the deformation modulus of soil-crushed-stone k_w to the relative soil moisture

Содержание щебня, % по объему	Величина поправки при относительной влажности грунта (W/Wт)					
	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

Таблица 4
Значения параметров формулы (1) и коэффициенты детерминации

Table 4
Values of the parameters of formula (1) and the coefficients of determination

Содержание щебня, % по объему	Значения постоянных коэффициентов полинома (1)				R2
	b_0	b_1	b_2	b_3	
40	6,3535	-20,004	23,123	-8,9699	0,993
50	6,0134	-19,054	22,597	-8,9977	0,989
60	5,0753	-15,592	18,679	-7,5216	0,990

Таблица 5
Эмпирические зависимости для расчета параметров формулы (1)

Table 5
Empirical dependencies for calculating the parameters of the formula (1)

Коэффициент формулы (1)	Формула для расчета
b_0	$b_0 = 1,7339 + 0,2351 \cdot X - 0,003 \cdot X^2$
b_1	$b_1 = 1,316 - 1,0354 \cdot X + 0,0126 \cdot X^2$
b_2	$b_2 = 1,4738 \cdot X - 0,017 \cdot X^2 - 8,693$
b_3	$b_3 = 6,1803 - 0,6795 \cdot X + 0,0075 \cdot X^2$
где X – содержание щебня в смеси, % по объему	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kettle R.J., McCabe E.Y. Mechanical Stabilization for the Control of Frost Heave. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2011. 12(4): 899-905. DOI:10.1139/l85-102.
2. Mahedi M., Cetin B., White D.J. Closure to "Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. 33(9):07021013. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003868.
3. Coban H.S., et al. Effects of Using Recycled Aggregates and Large Stones for Base and Subbase Layers on Modulus Properties of Pavements. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) *Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. 164. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-77230-7_28.
4. Han J., Leshchinsky D. Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010. Vol. 28(3): 262-267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012.
5. Tang X.C., Chehab G.R., Palomino A. Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008. 9(6): 413-429. DOI:10.1080/10298430802279827.
6. 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.
7. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Барац Н.И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 6(52). С. 72–79. DOI:10.26518/2071-7296-2016-6(52)-72-79.
8. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1(53). С. 103–110. DOI:10.26518/2071-7296-2017-1(53)-103-110.
9. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. № 2(21). С. 215–227. DOI:10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227.
10. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 74(6): 3–16. DOI:10.18720/MCE.74.1.
11. 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(17). С. 764–776. DOI:10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776.
12. 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. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132
13. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 2020. 992, 79–85. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.
14. Шнайдер В.А., Левашов Г.М., Сиротюк В.В. Определение требуемой прочности геосинтетических материалов для противозерозионной защиты неподтопляемых откосов земляного полотна // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 1(47). С. 72–80.
15. Матвеев С.А., Литвинов Н.Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 4(32). С. 57–61.
16. Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 4(44). С. 80–86. DOI:10.26518/2071-7296-2015-4(44)-80-86
17. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 94(2): 21–30. DOI: 10.18720/MCE.94.3
18. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 662:164-167. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.662.164
19. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 587-589: 1137-1140. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1137
20. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. Эмпирические условия пластичности в расчетах земляного полотна по сдвигу // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 10(85). С. 7–20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1.
21. Калинин А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 4(39). С. 35–45. DOI: 10.5862/MCE.39.4.
22. Кузин Н.В., Александров А.С. Об изменении напряжения вертикального сжатия в дорожных конструкциях // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: строительство и транспорт*. 2007. № 4(16). С. 221–225.
23. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2): 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7
24. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021. 58(1): 2–7. DOI:10.1007/s11204-021-09700-8
25. Долгих Г.В. Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасных давлений // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 6(34). С. 43–49.
26. Долгих Г.В. Определение первой критической нагрузки при расчете грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2016. № 3(46). С. 90–97.

27. Александрова Н.П., Семенова Т.В., Долгих Г.В. Совершенствование моделей расчета главных напряжений и девиатора в грунте земляного полотна // Вестник СибАДИ. 2014. № 2(36). С. 49–54.
28. Александров А.С. Исследование пластического деформирования дискретных материалов при воздействии циклических нагрузок и определение параметров математических моделей // Строительные материалы. 2016. №10. С. 27–32.
29. 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*. 2014. 1020: 31–36. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.31
30. Iliina, O.N., Ilin, I.B. Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 92(8): 115–126. DOI: 10.18720/MCE.92.10
31. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753, pp. 1-5. DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032006
32. Rudgalskiy, D. et al. Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1614: 1-9. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012004
33. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 640: 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/640/1/012080
34. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expansive soil. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018.11(17): 521. DOI:10.1007/s12517-018-3864-0
35. Oriola F.O.P., 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*. 2017. 14(37): 215-226.
36. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*. 2013. 4.: 1416-1424. DOI:10.4236/ijg.2013.410139
37. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE *Journal of Civil Engineering*. 2012. 16(6): 943–949. DOI:10.1007/s12205-012-1388-9
38. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. *Indian Geotechnical Journal*. 2014. 45(2): 217–224. DOI:10.1007/s40098-014-0127-1.
39. 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*. 2018. 43: 5193–5202. DOI:10.1007/s13369-017-3033-x
40. Colt, O.E., Razval, C. Geosynthetic reinforcement for base / subbase courses of road structures. *International Symposium: Highway and Bridge Engineering 2014*, 1-7.
41. Dong, Y.L., Han, J., Bai X.H. Numerical analysis of tensile behavior of geogrids with rectangular and triangular apertures. *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. 29(2): 83–91. DOI:10.1016/j.geotexmem.2010.10.007
42. Giroud, J.P., Han, J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: I. Development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130(8): 775–786. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775)
43. Giroud, J.P., Han, J: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: II. Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130 (8): 787–797. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(787)
44. Han, J., Leshchinsky, D: Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes* 2010. 28(3): 262–267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012
45. Han, J., Jiang, Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013. 5(5): 517–529. DOI:10.3724/SP.J.1226.2013.00517
46. Han, J. et al. Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. 23(11): 1525–1534. (2011). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286
47. 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*. 2020. vol 66. DOI: 10.1007/978-981-15-2349-6_16
48. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. 16(7): 587–601. DOI:10.1080/10298436.2014.943209
49. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*. 2017. 18(3): 236-246. DOI:10.1080/10298436.2015.1065991
50. 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*. 2016. 143: 300–307. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.038
51. Karaulov, A.M., Korolev, K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Freestanding Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. 54(4): 211–215. DOI:10.1007/s11204-017-9460-6
52. Karaulov, A.M., Korolev, K.V.: On the determination of the maximum earth pressure on retaining walls *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. 52(4): 175–180. DOI:10.1007/s11204-015-9325-9

53. Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N.: Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. RoadexIII Northern Periphery. 2008.

54. Dawson, A.R., et al: Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2007. 1989(1): 165–172. DOI:10.3141/1989-19

55. Chandak P.G., et al: Performance Evaluation of Low Volume Rural Roads- A State-of-the-Art Review. In: Frikha W., Kawamura S., Liao WC. (eds) New Developments in Soil Characterization and Soil Stability. GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. 43–57 (2019). DOI:10.1007/978-3-319-95756-2_5

56. Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Метод расчета остаточных деформаций, применяемых в основаниях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2019. № 4(68). С. 456–471. DOI:10.26518/2071-7296-2019-4-456-471

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

REFERENCES

1. Kettle R.J., McCabe E.Y. Mechanical Stabilization for the Control of Frost Heave. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2011. 12(4), p. 899-905. DOI:10.1139/I85-102.

2. Mahedi M., Cetin B., White D.J. (2021). Closure to “Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison”. *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 33(9):07021013. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003868.

3. Coban H.S., et al. (2022) Effects of Using Recycled Aggregates and Large Stones for Base and Subbase Layers on Modulus Properties of Pavements. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) *Advances in Transportation Geotechnics IV*. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 164. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-77230-7_28.

4. Han J., Leshchinsky D. Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010. Vol. 28(3). Pp. 262-267. DOI:10.1016/j.geotexmem.2009.09.012.

5. Tang X.C., Chehab G.R., Palomino A. Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008. Vol. 9(6). Pp. 413-429. DOI:10.1080/10298430802279827.

6. 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. (in Russian)

7. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnykh harakteristik zoloshlakovoy smesi *The Russian Automobile*

and Highway Industry Journal, 2016, 52(6): 72-79. DOI:10.26518/2071-7296-2016-6(52)-72-79. (in Russian)

8. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformatsionnykh harakteristik zoloshlakovykh smesey // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 53(1): 103-110. DOI:10.26518/2071-7296-2017-1(53)-103-110. (in Russian)

9. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopostavlenie deformatsionnykh parametrov zoloshlakovoy smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227. DOI:10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227. (in Russian)

10. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 74(6): 3–16. DOI:10.18720/MCE.74.1. (in Russian)

11. 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. DOI:10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776. (in Russian)

12. Lytkin A.A. Vliyanie povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na karakter 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. DOI:10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132 (in Russian)

13. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 2020. 992, 79–85. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79 (in Russian)

14. Schneider V.A., Levashov G.M., Sirotyuk V.V. The definition of strength required geosynthetics for erosion control nepotoplyaemyj protection slope subgrade. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 1(47):72-80. (in Russian)

15. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opredelenie deformatsionnykh harakteristik shchebenochno-peschanogo osnovaniya, armirovannogo stal'noj geosetkoj *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013, 32(4): 57-61. (in Russian)

16. 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. DOI:10.26518/2071-7296-2015-4(44)-80-86(in Russian)

17. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 94(2): 21–30. DOI: 10.18720/MCE.94.3

18. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on

- a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 662:164-167. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.662.164
19. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 587-589:1137-1140. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.1137
 20. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. Empirical conditions of plasticity in calculations of the subgrade by shift. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2019. 10(85): 7-20. DOI: 10.18720/CUBS.85.1(in Russian)
 21. Kalinin A.L. Application of modified yield criteria for calculation of safe pressures on the subgrade soil. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. 39(4): 35–45. (rus). DOI: 10.5862/MCE.39.4.
 22. Kuzin N.V., Aleksandrov A.S. Ob izmenenii napryazheniya vertikal'nogo szhatiya v dorozhnykh konstrukciyakh *Izvestiya orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: stroitel'stvo i transport*. 2007, 16(4): 221-225. (in Russian)
 23. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 86(2): 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7(in Russian)
 24. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021. 58(1): 2–7. DOI:10.1007/s11204-021-09700-8(in Russian)
 25. Dolgikh G.V. Raschet gruntov zemlyanogo polotna po kriteriyu bezopasnykh davlenij *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. 34(6): 43-49. (in Russian)
 26. Dolgikh G.V. Opredelenie pervoj kriticheskoy nagruzki pri raschete gruntov zemlyanogo polotna po soprotivleniyu sdvigu // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2016. 3 (46): 90-97. (in Russian)
 27. Aleksandrova N.P., Semenova T.V., Dolgikh G.V. Sovershenstvovanie modelej rascheta glavnnykh napryazhenij i deviatora v grunte zemlyanogo polotna [Improvement of models for calculating the main stresses and the deviator in the ground of the road-bed]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2014. 2 (36): 49-54. (in Russian)
 28. Aleksandrov A.S. Issledovanie plasticheskogo deformirovaniya diskretnykh materialov pri vozdeystvii ciklicheskih nagruzok i opredelenie parametrov matematicheskikh modelej [Investigation of plastic deformation of discrete materials under the influence of cyclic loads and determination of parameters of mathematical models] *Stroitel'nye materialy*. 2016. 10: 27-32. (in Russian)
 29. 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*. 2014. 1020: 31–36. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.31
 30. Iliina, O.N., Ilin, I.B. Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 92(8): 115–126. DOI: 10.18720/MCE.92.10
 31. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753, pp. 1-5. DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032006
 32. Rudgalskiy, D. et al. Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1614: 1-9. DOI:10.1088/1742-6596/1614/1/012004
 33. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 640: 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/640/1/012080
 34. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expansive soil. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. 11(17): 521. DOI:10.1007/s12517-018-3864-0
 35. Oriola F.O.P., 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*. 2017. 14(37): 215-226.
 36. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*. 2013. 4: 1416-1424. DOI:10.4236/ijg.2013.410139
 37. Naeni, S.A, Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2012. 16(6): 943–949. DOI:10.1007/s12205-012-1388-9
 38. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. *Indian Geotechnical Journal*. 2014. 45(2): 217–224. DOI:10.1007/s40098-014-0127-1.
 39. 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*. 2018. 43: 5193–5202. DOI:10.1007/s13369-017-3033-x
 40. Colt, O.E., Razval, C. Geosynthetic reinforcement for base / subbase courses of road structures. *International Symposium: Highway and Bridge Engineering 2014*, 1-7.
 41. Dong, Y.L., Han, J., Bai X.H. Numerical analysis of tensile behavior of geogrids with rectangular and triangular apertures. *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. 29(2): 83–91. DOI:10.1016/j.geotextmem.2010.10.007
 42. Giroud, J.P., Han, J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: I. Development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130(8): 775-786. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775)
 43. Giroud, J.P., Han, J: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: II. Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004. 130 (8): 787-797. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(787)
 44. Han, J., Leshchinsky, D: Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geo-*

textiles and Geomembranes 2010. 28(3): 262–267. DOI:10.1016/j.geotextmem.2009.09.012

45. Han, J., Jiang, Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2013. 5(5): 517–529. DOI:10.3724/SP.J.1226.2013.00517

46. Han, J. et al. Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. 23(11): 1525–1534. (2011). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286

47. 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*. 2020. 66. DOI: 10.1007/978-981-15-2349-6_16

48. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behavior of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. 16(7): 587–601. DOI:10.1080/10298436.2014.943209

49. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*. 2017. 18(3): 236-246. DOI:10.1080/10298436.2015.1065991

50. 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*. 2016. 143: 300–307. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.038

51. Karaulov, A.M., Korolev, K.V. A Static Solution for the Problem of the Stability of a Smooth Free-standing Sheet Pile Wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. 54(4): 211–215. DOI:10.1007/s11204-017-9460-6

52. Karaulov, A.M., Korolev, K.V.: On the determination of the maximum earth pressure on retaining walls *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. 52(4):175–180. DOI:10.1007/s11204-015-9325-9

53. Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N.: Understanding Low-Volume Pavement Response to Heavy Traffic Loading. *RoadexIII Northern Periphery*. 2008.

54. Dawson, A.R., et al: Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2007. 1989(1): 165–172. DOI:10.3141/1989-19

55. Chandak P.G., et al: Performance Evaluation of Low Volume Rural Roads- A State-of-the-Art Review. In: Frikha W., Kawamura S., Liao WC. (eds) *New Developments in Soil Characterization and Soil Stability*. *GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. 43–57 (2019). DOI:10.1007/978-3-319-95756-2_5

56. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Metod rascheta ostatochnyh deformacij, primenyayemyh v osnovaniyah dorozhnyh odezhd // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* ,

2019, 68(4): 456–471. DOI:10.26518/2071-7296-2019-4-456-471. (in Russian)

57. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Analiz prichin koleeobrazovaniya na pokrytyyah nezhestkih dorozhnyh odezhd i rekomendacii po umen'sheniyu etogo yavleniya // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 70(6): 718–745. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пролыгин А.С. Произвел изготовление образцов, выполнил экспериментальные испытания и математическое моделирование.

Долгих Г.В. Произвел постановку задачи, разработку методики выполнения экспериментальных работ, редактирование текста статьи.

Калинин А.Л. Принял в подготовке образцов к испытанию и в их испытании образцов. Редактировал текст статьи.

Александрова Н.П. Произвела написание текста статьи, статистическую обработку данных.

COAUTHORS ' CONTRIBUTION

Aleksandr S. Prolygin produced samples, performed experimental tests and mathematical modelling.

Gennadii V. Dolgikh formulated the problem, developed a methodology for performing experimental work, and edited the text of the article.

Aleksandr L. Kalinin participated in the preparation of samples for testing and in their testing of samples, edited the text of the article.

Natalia P. Alexandrova wrote the text of the article, performed statistical processing of the experimental data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Калинин Александр Львович – ст. преп. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» .

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Prolygin, Postgraduate student of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57222243670,

Gennadii V. Dolgikh, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57199391542.

Aleksandr L. Kalinin, Senior teacher of the Road Construction and Maintenance Department.

Natalia P. Alexandrova, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Road Construction and Maintenance Department, Author ID: 57191525817.