

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/13>

УДК 630 + 69.059



Влияние стабилизирующих добавок на модули упругости и деформации грунтовой смеси основания дорожной одежды при транспортном освоении лесосырьевой базы юга Республики Карелия

Артем В. Степанов✉, stepanov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>

Василий К. Катаров, vkatarov@petrsu.ru <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>

Владимир С. Сюнёв, siounev@petrsu.ru <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Елена И. Ратькова, ratjkova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9236-946X>

Геннадий Н. Колесников, kgn@petrsu.ru <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Производственно-технологическая возможность уменьшения расхода цемента и модификатора грунтов при сохранении соответствия модулей упругости и деформации нормативным значениям является актуальной задачей при дорожном строительстве, особенно на нестабильных, слабых грунтах. В районе освоения лесосырьевой базы Олонецкого района Республики Карелия исследовано влияние добавки цемента не более 2 % по массе и модификатора на модуль упругости и модуль деформации грунта земляного полотна автомобильной дороги с учетом нормативных показателей стабилизированных грунтовых смесей для дорожного строительства. Для получения количественных оценок использована авторская экспериментальная методика, отличающаяся тем, что модуль упругости определяется в точке перегиба восходящей ветви графика «напряжение–относительная деформация» с использованием условия равенства нулю второй производной. Получены значения модулей упругости 165 ± 24 МПа ($p < 0.05$) и деформации 16 ± 3 МПа ($p < 0.05$), которые превышают рекомендуемые значения, указанные в ОДМ 218.3.076-2016 и ГОСТ 25100-2020. Дополнительное исследование физико-механических свойств местных грунтов для дорожного строительства по рассмотренной методике позволяет получить технико-экономический эффект от 1 до 8%, в зависимости от местных почвенно-климатических условий) за счет оптимизации расхода цемента и модификатора грунта для земляного полотна автомобильной дороги. В перспективе на стадии проектирования должны быть приняты во внимание и другие характеристики, указанные в ОДМ 218.3.076-2016, которые также требуют экспериментального уточнения с учетом особенностей местных грунтов. Например, капиллярное водонасыщение грунта земляного полотна лесовозной автомобильной дороги не должно превышать 6 %.

Ключевые слова: модуль упругости, модуль деформации, земляное полотно, стабилизирующие добавки, лесовозная автомобильная дорога

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние стабилизирующих добавок на модули упругости и деформации грунтовой смеси основания дорожной одежды при транспортном освоении лесосырьевой базы юга Республики Карелия / А. В. Степанов, В. К. Катаров, В. С. Сюнёв, Е. И. Ратькова, Г. Н. Колесников // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 222–237. – Библиогр.: с. 233–236 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/13>.

Поступила 05.09.2024. Пересмотрена 25.09.2024. Принята 26.09.2024. Опубликована онлайн 11.11.2024.

Article

The influence of stabilizing additives on the modulus of elasticity and deformation of the soil mixture of the pavement base during the transport development of the forest resource base in the south of the Republic of Karelia

Artyom V. Stepanov✉, stepanov@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>

Vasiliy K. Katarov, vkatarov@petsu.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>

Vladimir S. Syunev, siunev@petsu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Elena I. Ratkova, ratjkova@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9236-946X>

Gennady N. Kolesnikov, kgn@petsu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

Petrozavodsk State University, Lenin Street, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Abstract

The production and technological possibility of reducing the consumption of cement and soil modifier while maintaining compliance with the modulus of elasticity and deformation with regulatory values is an urgent task in road construction, especially on unstable, weak soils. In the area of development of the timber resource base of the Olonetsky district of the Republic of Karelia, the effect of cement additives of no more than 2% by weight and a modifier on the modulus of elasticity and modulus of deformation of the soil of the roadbed was studied, taking into account the normative indicators of stabilized soil mixtures for road construction. To obtain quantitative estimates, the author's experimental technique was used, characterized in that the modulus of elasticity is determined at the inflection point of the ascending branch of the stress–relative deformation graph using the condition of equality of the second derivative to zero. The values of elastic modulus (165 ± 24 MPa) mean plus minus standard deviation ($p < 0.05$) and deformation (16 ± 3 MPa) mean plus minus standard deviation ($p < 0.05$) were obtained, which exceed the recommended values specified in ODM 218.3.076-2016 and GOST 25100-2020. An additional study of the physical and mechanical properties of local soils for road construction according to the considered methodology allows us to obtain a technical and economic effect (from 1 to 8%, depending on local soil and climatic conditions) (figures) by optimizing the consumption of cement and a soil modifier for the roadbed. In the future, at the design stage, other characteristics specified in ODM 218.3.076-2016 should be taken into account, which also require experimental refinement taking into account the characteristics of local soils. For example, the capillary water saturation of the soil of the roadbed of a logging highway should not exceed 6%.

Keywords: *modulus of elasticity, modulus of deformation, roadbed, stabilizing additives, logging road*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Stepanov A. V., Katarov V. K., Syunev V. S., Ratkova E. I., Kolesnikov G. N. (2024). The influence of stabilizing additives on the modulus of elasticity and deformation of the soil mixture of the pavement base during the transport development of the forest resource base in the south of the Republic of Karelia. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 222-237 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/13>.

Received 05.09.2024. *Revised* 25.09.2024. *Accepted* 26.09.2024. *Published online* 11.11.2024.

Введение

Климатические особенности Арктики северозападной части России обусловлены продолжительной отрицательной температурой в зимний период, с 20-х чисел октября до середины апреля, мая, коротким и относительно прохладным летом, и большим среднегодовым количеством атмосферных осадков в диапазоне от 550 мм. до 750мм. Такие условия стали причиной образования болотно-подзолистых грунтов и обширных торфяников на пониженных участках рельефа, и подзолистых остаточно-карбонатных с перегнойно-карбонатными грунтами на возвышенностях.

Подзолистые почвы появляются в суглинистых грунтах при цикличном замерзании и оттаивании в водонасыщенном состоянии, что как раз и является характерной особенностью Мурманской и Архангельской области, а также Республики Карелия. А суглинистые грунты имеют низкие значения коэффициента фильтрации и высокие показатели по набуханию, водонасыщению.

При этом грунты — это основной строительный материал автомобильных дорог, от качества которого во многом зависит надежность всего сооружения.

Из-за низкой плотности населения данного региона, в среднем 3,53 человека на км², преобладают дороги с 4 и 5 технической категориями. Этим категориям свойственно проходить по обертывающей рельефа, с минимальными объемами земляных работ, в нулевых отметках, т.е. насыпях до 1,5 метров.

В суглинистых грунтах в низких насыпях неизбежно будет происходить его переувлажнение, за счет капиллярного поднятия воды, тем самым уменьшая несущую способность рабочего слоя земляного полотна.

В современных условиях повышение качества автомобильных дорог остается актуальной проблемой, на решение которой ориентировано большое число исследований. Вопросы технологической связи гидромеханических трансмиссий лесотранспортных машин с воздействием на почвенно-растительную среду рассмотрены в работе П. А. Сокола и др. (2023) [1]. В работе В. В. Гудкова (2022) [2] дана

оценка применимости двухосных сочлененных лесотранспортных машин в условиях лесосеки.

На сегодняшний день, в стране, существует тенденция к проведению ремонтных работ на дорогах, нежели к проведению капитальных ремонтов. А при проведении ремонтных работ, в большинстве случаев, затрагиваются только конструктивы дорожных одежд.

Одно из ключевых направлений в решении проблемы повышение качества автомобильных дорог связано с применением добавок к грунтам для улучшения их физико-механических характеристик.

Технология с применением ресайклинга позволяет в значительной степени укрепить рабочие слои основания без замены нижележащих слабых грунтов.

Вопросам стабилизации грунта в дорожном строительстве посвящены работы Р. А. Бехтерева и др. (2022) [3], Т. В. Дмитриевой и др. (2020) [4], М. Kianimehr и др. (2019) [5], Ch. Du и др. (2019) [6]. Также в статьях М. Д. Кабалина и др. (2023) [7], А. Ngo'o Ze и др. (2022) [8], К. Sahile и др. (2021) [9], N.W. Jassim и др. (2022) [10] рассмотрены проблемы укрепления грунтов в дорожном строительстве. Опыт применения модифицирующих добавок обобщен в ОДМ 218.3.076-2016 «Рекомендуемые показатели стабилизаторов грунтов и стабилизированных грунтовых смесей для дорожного строительства».

Грунты земляного грунта автомобильной дороги должны соответствовать определенным требованиям действующих стандартов. К физико-механическим характеристикам усиленных добавками грунтов относятся, наряду с другими характеристиками согласно ОДМ 218.3.076-2016, предел прочности грунта на одноосное сжатие, модуль упругости и модуль деформации.

При проектировании дорожных одежд есть определенная последовательность расчетов на основе результатов которых дается заключение о возможности применения конструктива в заданных условиях. Одним из стартовых параметров для расчетов служит модуль упругости рабочего слоя земляного полотна.

Проблема заключается в том, что при расчете принимают значение влажности в оптимальных гра-

ницах, а на практике зачастую влажность превышает эти рамки, что влечет к понижению модуля упругости. Как следствие, отказы в работе дорожной одежды происходят раньше, т.е. надежность падает.

Вопросы улучшения физико-механических характеристик и напряженно-деформируемого состояния укрепленных грунтов освещены в работах Ю. В. Грачевой и др. (2021) [11], О.О. Ојуги и др. (2022) [12], В. Yang и др. (2022) [13], А. А. Лунева и В. В. Сиротюка (2019) [14], (2021) [15].

Согласно ОДМ 218.3.076-2016, предел прочности грунта на одноосное сжатие определяется как отношение нагрузки, при которой происходит разрушение образца, к площади первоначального поперечного сечения.

Модуль упругости, с точки зрения теории упругости, связывает напряжения и упругие деформации. С физической точки зрения модуль упругости характеризует жесткость грунта. С геометрической точки зрения модуль упругости численно равен тангенсу угла наклона касательной к кривой, построенной в координатах напряжение-деформация. Угол наклона касательной зависит от выбора точки, через которую проведена касательная, поэтому можно выбрать такую точку на кривой напряжение-деформация, для которой модуль упругости будет наибольшим, как показано на примере в дальнейшем изложении.

Модуль деформации, называемый также модулем общей деформации, в отличие от модуля упругости учитывает полную деформацию материала под воздействием нагрузок. Этот показатель является основным в расчетах нежестких дорожных одежд. В работе Я. А. Калужского¹ и О.Т. Батракова (1970) показано, что полная деформация равна сумме упругой (обратимой) и пластической (необратимой) деформаций. Согласно исследованиям А.Г. Шашкина² (2011), приближенное значение модуля деформации грунта в 5...10 раз больше модуля упругости.

Различают модули упругости и деформации при первичной и при повторной нагрузке на образец. В работах Л. А. Строковой³ (2013) и А. А. Лыткина и др. (2024) [16] показано, что с ростом числа циклов «нагрузка – разгрузка» значения модулей могут изменяться вследствие уплотнения или разупрочнения грунта.

Прочность, модули упругости и деформации, гранулометрический состав и другие характеристики грунтов весьма вариабельны, т.к. зависят от особенностей региональных геологических условий происхождения грунтов и горных пород. Учесть эту вариабельность можно, если ориентироваться на нижние оценки прочности и модулей упругости, чтобы гарантировать качество автомобильной дороги. Однако точный, насколько это технически возможно, учет характеристик грунтов на стадии проектирования земляного полотна автомобильной дороги позволяет, например, не использовать избыточно большие коэффициенты запаса прочности и получить определенный технико-экономический эффект за счет оптимизации расхода ресурсов. Для реализации этой возможности необходимы исследования образцов местных грунтов с их привязкой к конкретному региону.

С учетом отмеченных обстоятельств в данной работе сформулирована рабочая гипотеза исследования: экспериментальное исследование местных материалов для дорожного строительства и учет этих результатов на стадии проектирования позволит оптимизировать расходы ресурсов на стадии строительства, обеспечивая при этом соответствие модулей упругости и деформации нормативным значениям, указанным в ОДМ 218.3.076-2016. Соответственно, цель данной работы: экспериментальная оценка влияния добавок цемента и модификатора на модуль упругости, модуль деформации и на прочность грунта земляного полотна автомобильной дороги, построенной в Олонецком районе Республики Карелия.

¹Калужский Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: учебное пособие / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. Москва, 1970. 160 с.

²Шашкин А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А. Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011;2:1-32. URL: <http://www.urban-development.ru/2011/7.pdf>.

³Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей. Вестник Томского государственного университета. 2013; 367: 190-194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18813817>.

Материалы и методы

Объект исследования представляет собой лесовозную автомобильную дорогу, высокой категории II – магистраль, на которой проводились работы по устройству основания дорожного полотна, укрепленного минеральным вяжущим и пластифицирующей добавкой (наноструктурированным стабилизатором «Статус-5»). Дорога осуществляет связь лесозаготовительного района с расчетной лесосекой около двухсот тысяч кубических метров с автомагистралью общего пользования Р-21. Объект находится во второй дорожно-климатической зоне, второй подзоне, первой схеме увлажнения рабочего слоя, рельеф района – равнинный, глубина промерзания грунта – шестьдесят сантиметров. Вторая дорожно-климатическая зона располагается на севере от Мончегорска до Калуги с юга, от Калининграда с запада и до Красноярска с востока, а также Приморский край и остров Сахалин, что говорит о применимости результатов исследования на достаточно большой части территории России.

Согласно технологической карте, работы проводятся в сухую погоду при среднесуточной температуре воздуха не менее плюс пять градусов Цельсия. При среднесуточных температурах воздуха в пределах от плюс пяти градусов Цельсия до минус десяти градусов Цельсия должны осуществляться специальные меры: утепление основания, подогрев воды, введение водных растворов хлористых солей. Работы по укреплению основания выполняются с применением цемента ЦЕМ I 42.5Н и наноструктурированного стабилизатора «Статус-5». Согласно ГОСТ 31108-2020, ЦЕМ I 42.5Н по вещественному составу это портландцемент, нормально твердеющий с прочностью на сжатие в возрасте 2 суток не менее 10 Мпа и в возрасте 28 суток не менее 42,5 Мпа, с началом схватывания не ранее чем через 60 минут.

При входном контроле устанавливают соответствие стандартам качества каждой поступающей партии исходных материалов: скелетного материала, если его добавка предусмотрена (согласно ГОСТ 8267, ГОСТ 32703, 8736, ГОСТ 23735, ГОСТ 25607), цемента (по ГОСТ 31108-2020 и ГОСТ Р 55224-2020) и воды согласно ГОСТ 23732.

При приемочном контроле готового слоя основания оценивают модуль упругости, измеряемый каждые три тысячи метров квадратных, на расстоянии не менее одного метра от кромки основания.

Методика внесения цемента и стабилизатора в существующий материал покрытия, а также его перемешивания до однородной массы производится с использованием технологии холодной регенерации (ресайклинга). В качестве скелетообразующего материала на объекте оказалась щебеночно-гравийно-песчаная смесь неоптимального состава.

Предметом исследования для экспериментального определения прочности, модуля упругости и модуля деформации усиленного грунта при сжатии использованы образцы в форме куба 100×100×100 мм, подготовленные на стадии строительства дороги из того же материала, что и слой дорожной конструкции. Образцы взяты на расстоянии один метр от кромки проезжей части через четыре-ста метров друг от друга.

Дизайн эксперимента

Испытания выполнены с использованием тест-машины Shimadzu (рис. 1) в лаборатории Института лесных, горных и строительных наук ПетрГУ. Первичные данные испытаний в виде графиков в координатах «смещение-нагрузка» показаны на рис. 2. Эти данные подлежат пересчету для графического представления в координатах «напряжение-относительная деформация» (рис. 3).



Рисунок 1. Образцы грунта и тест-машина

Figure 1. Samples and test machine

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

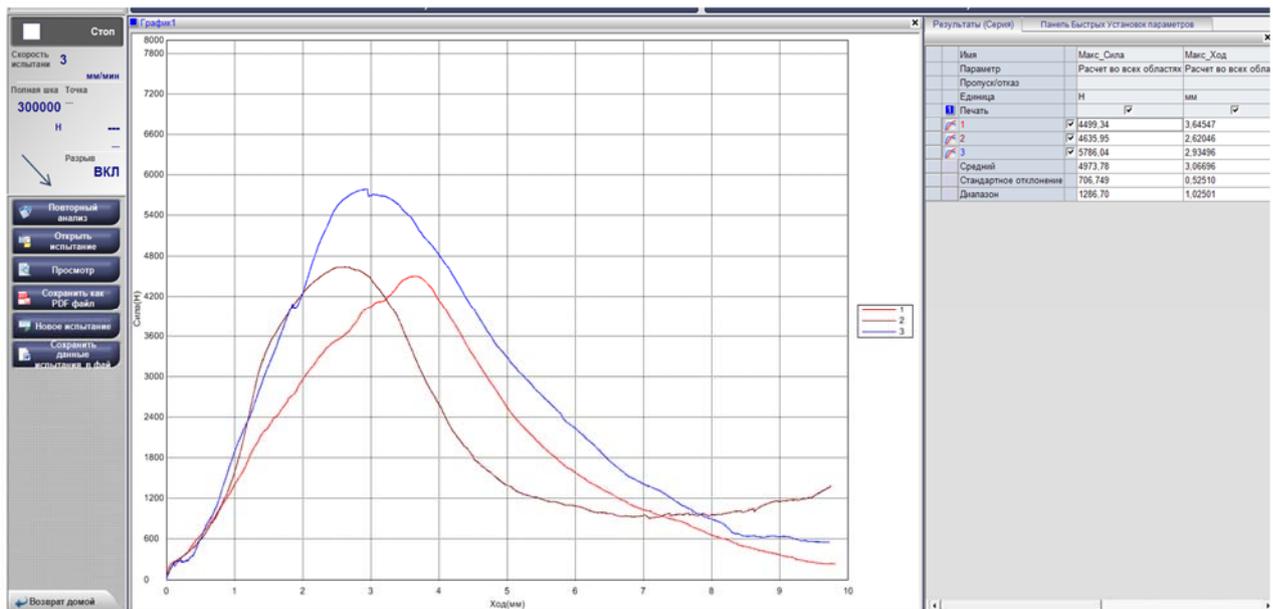


Рисунок 2. Первичные данные испытаний

Figure 2. Primary test data

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

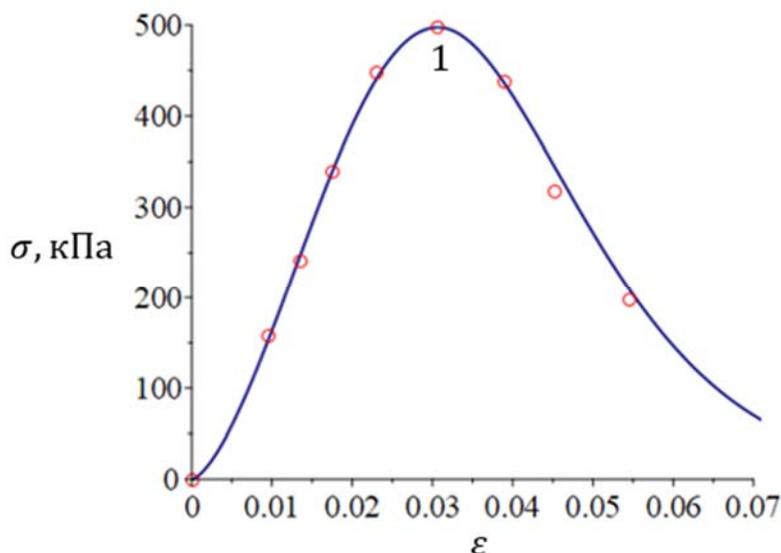


Рисунок 3. Усредненные экспериментальные данные (кружки) и аппроксимирующая кривая

Figure 3. Averaged experimental data (circles) and fitting curve

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

Анализ данных

Интерес представляет наибольшее значение модуля упругости, которое достигается в точке перегиба восходящей ветви кривой напряжение-деформация (рис. 3). Эту точку можно определить визуально, что, однако, не гарантирует высокую точность расчета. Чтобы определить эту точку математически корректно, мы используем аппроксимацию экспериментальных данных кривой, уравнение которой можно представить в следующем виде [17]:

$$\sigma = \sigma_{\text{peak}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{peak}}} e^{\frac{1}{n} \left(1 - \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon_{\text{peak}}^n} \right)} \right)^B. \quad (1)$$

В уравнении (1) обозначено: σ_{peak} и $\varepsilon_{\text{peak}}$ – напряжение и относительная деформация в пиковой точке 1 (рис. 3); n и B – параметры модели.

Возможна альтернативная методика: использовать уравнение (1) для аппроксимации каждой из экспериментальных кривых (рис. 2) и продолжить их обработку. Однако выбор любой методики предполагает, что безразмерные параметры модели n и B

в уравнении (1) определяются с использованием условия наилучшего приближения к экспериментальным данным, которое может быть реализовано, например, методом наименьших квадратов по аналогии с исследованием N. Stojković¹ и др. (2017). В рассматриваемом случае более простым в численной реализации оказался приведенный в работе J. S. Arora² и др. (1995) алгоритм случайного поиска, с использованием которого для восходящей ветви графика по рис. 3 получены значения $n = 2,378$ и $B = 1,524$. Нисходящая ветвь графика далее не используется.

Результаты

Координаты точки перегиба восходящей ветви графика (рис. 3), в которой модуль упругости наибольший, математически корректно определяются из условия равенства нулю второй производной функции $\sigma(\varepsilon)$ (1), что устраняет возможные ошибки, характерные для ручного счета. Результаты компьютерной обработки графика по рис. 3 с использованием уравнения (1) отражены на рис. 4.

¹Stojković N., Perić D., Stojčić D., Marković N. New stress-strain model for concrete at high temperatures. Tehnički vjesnik. 2017; 24 (3): 863-868. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20151027225413>

²Arora J.S., Elwakeil O.A., Chahande A.I., Hsieh C.C. Global optimization methods for engineering applications: a review. Structural optimization. 1995; 9: 137-159. DOI: <http://doi.org/10.1729/Journal.20305>. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01743964>

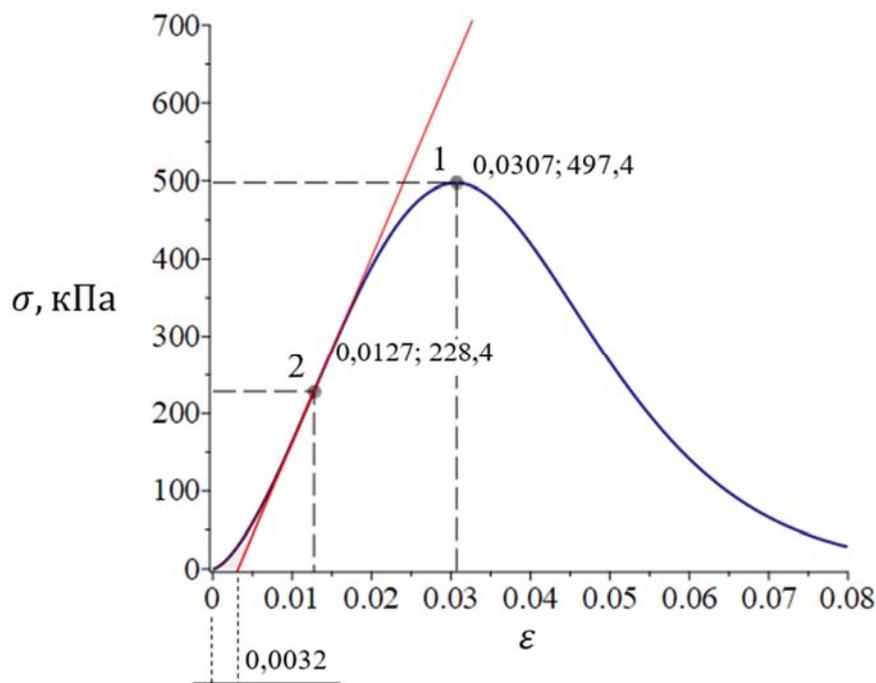


Рисунок 4. К определению модуля упругости

Figure 4. Towards the determination of the modulus of elasticity

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

С использованием Рисунка 4 определяем модуль упругости при однократной нагрузке (рис. 4):

$$E = \frac{228400}{0,0127 - 0,0032} = 24 \text{ МПа.}$$

Среднее значение максимальной нагрузки на образец составляет 4973 Н. Соответственно, среднее значение максимального напряжения в испытаниях до разрушения при сжатии равно $\frac{4973}{0,1 \cdot 0,1} = 497300$ Па ≈ 497 кПа.

Приведенное выше значение модуля упругости $E = 24$ МПа определено при однократной нагрузке, которая вызывает уплотнение грунта и повышение модуля упругости. Однако нагрузка в лю-

бой точке дорожного покрытия повторяется с каждым проходом катка при строительстве или проездом автомобиля в процессе эксплуатации дороги, как показано в работе В. К. Катарова и др. (2021) [18]. Поэтому реалистичные значения модуля упругости должны быть получены при повторной нагрузке в испытаниях без разрушения, но при достаточно большой нагрузке¹. График цикла «нагрузка–разгрузка–нагрузка» при сжатии указанного выше образца $100 \times 100 \times 100$ мм показан на рис. 5. Графическое определение модуля упругости при повторной нагрузке с использованием данных по рис. 5 показано на рис. 6.

¹Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей. Вестник Томского государственного университета. 2013; 367: 190-194. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18813817>.

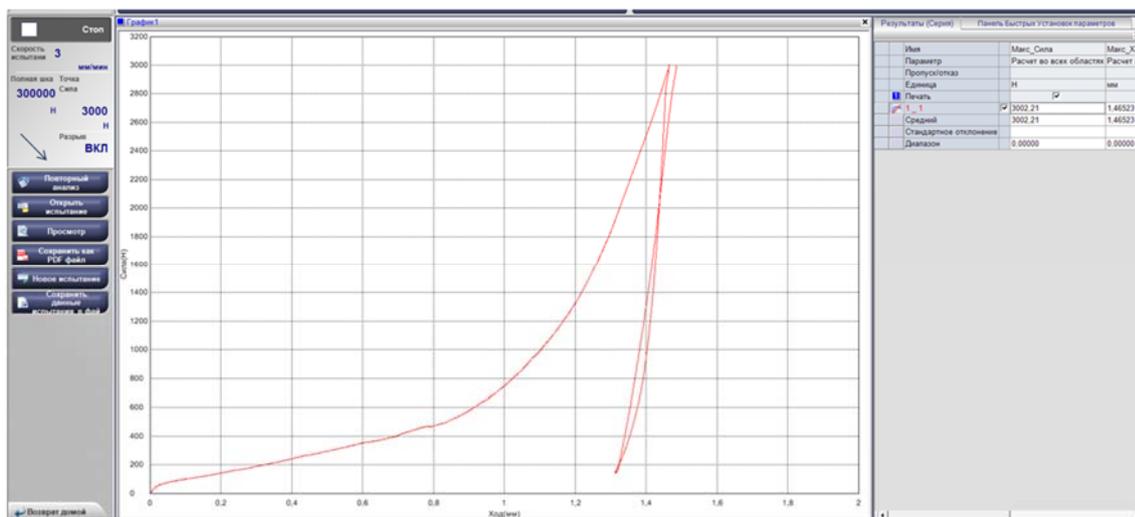


Рисунок 5. График «нагрузка–разгрузка–нагрузка»

Figure 5. Load-unload-load graph

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

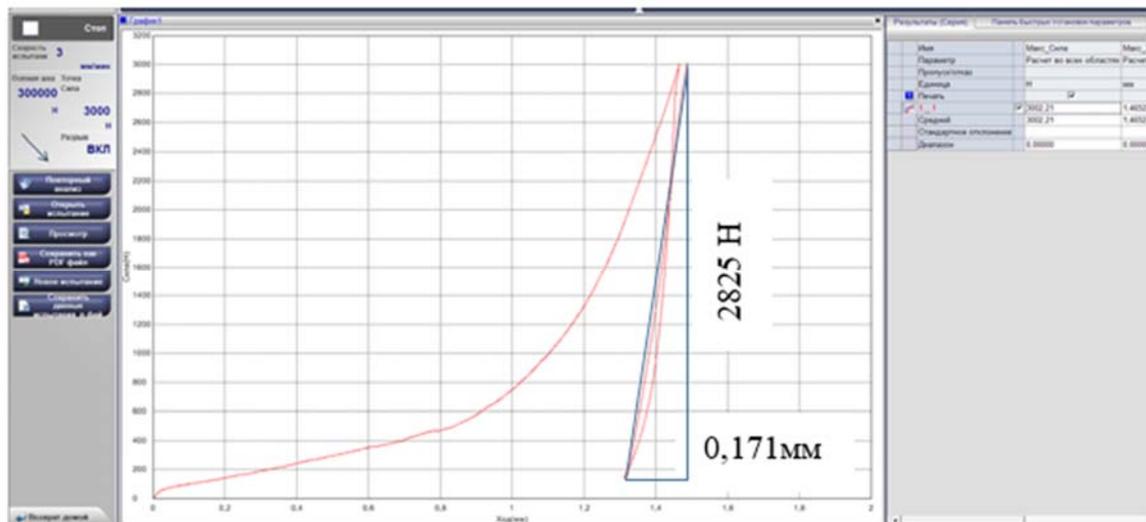


Рисунок 6. К определению модуля упругости при повторной нагрузке

Figure 6. Towards the determination of the modulus of elasticity under repeated loading

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

Используя данные по рис. 6 и начальные размеры образца, находим модуль упругости по восходящей ветви при повторной нагрузке:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{2825 \cdot 0,1 \cdot 1000}{0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,171} = 165 \text{ МПа.} \quad (2)$$

Пять циклов «нагрузка–разгрузка–нагрузка» того же образца (рис. 7) показывают, что поведение

образца после первого цикла стабилизировалось и модуль упругости остается примерно равным найденному выше (2). Кроме того, дрейф петель «нагрузка–разгрузка» вправо отражает процесс накопления небольших остаточных деформаций грунта (примерно 0,0001 мм в одном цикле), которые являются причиной появления колеи.

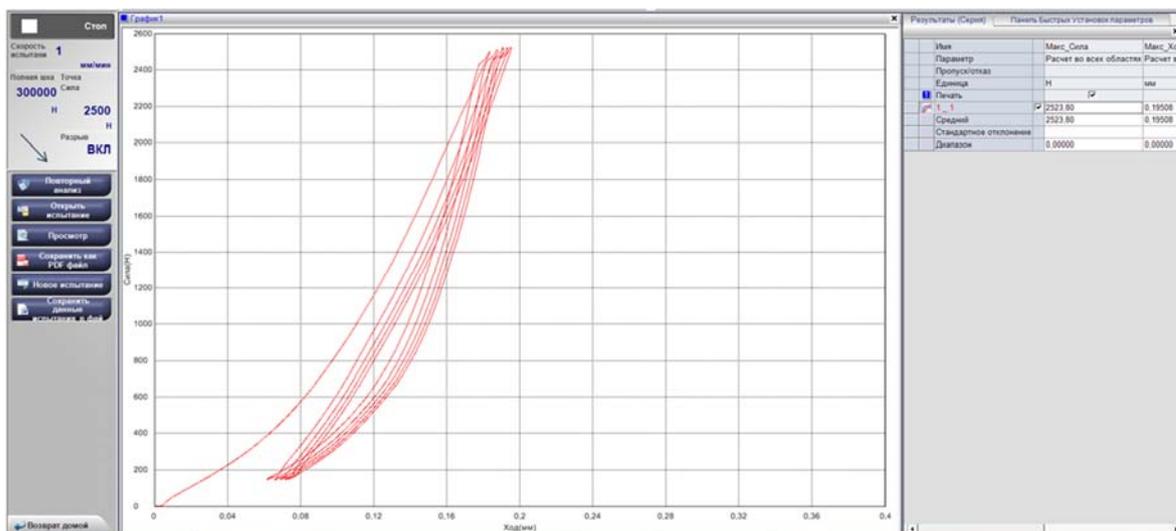


Рисунок 7. Поведение образца при циклической нагрузке (пять циклов)

Figure 7. Sample behavior under cyclic loading (five cycles)

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

Отмеченная выше тенденция, в которой модуль упругости почти не изменяется, зафиксирована, например, если число циклов возрастает до 100 (рис. 8). Однако, если число циклов очень большое, то суммарные микроповреждения и пластические (они же остаточные) деформации материала с каж-

дым циклом растут и их суммарный объем в конечном счете достигает критических значений в стадии разрушения. Заметим, что испытания на циклическую нагрузку до разрушения требуют больших затрат времени и поэтому не всегда могут быть завершены в разумные сроки.

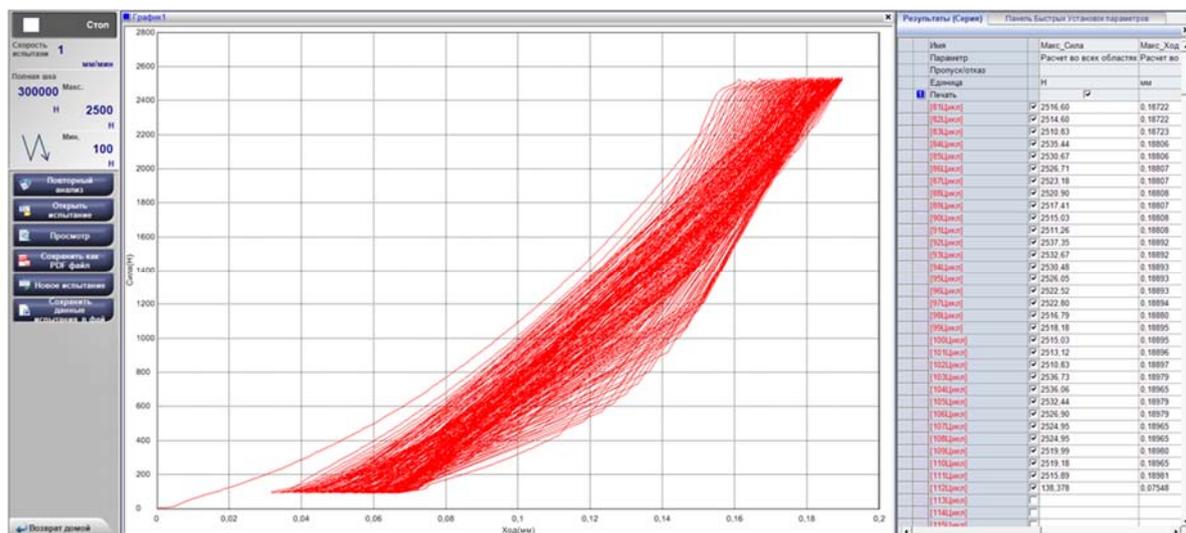


Рисунок 8. Поведение образца, если число полных циклов «нагрузка – разгрузка» равно 111

Figure 8. Behavior of the sample if the number of complete «load-unload» cycles is 111

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

Принимая во внимание, что каждый цикл «нагрузка – разгрузка» аналогичен одному проходу колеса транспортного средства, приходим к выводу, что выше получено теоретически и экспериментально обоснованное значения модуля упругости уплотненного грунта автомобильной дороги (2). Для проверки этого вывода сравним найденное значение (165 МПа) с нормативным значением. В соответствии с Таблицей 7 в ОДМ 218.3.076-2016 минимальное значение модуля упругости грунта, обработанного стабилизатором, с добавкой вяжущего не более 2 % (комплексная стабилизация), должно быть равно 120 МПа. Относительное превышение составляет $(165-120) \cdot 100\% / 120 = 37,5\%$. Столь значительное превышение указывает на техническую возможность уменьшения этого значения, что экономически целесообразно и технически возможно за счет уменьшения расхода цемента и (или) модификатора грунта. Однако практическая реализация этой возможности требует дополнительных исследований по рассмотренной методике с акцентом на технико-экономические аспекты. Заметим, что прочность грунта, обработанного стабилизатором, с добавкой вяжущего не более 2 % (комплексная стабилизация), на сжатие в ОДМ 218.3.076-2016 не регламентируется.

Другие характеристики грунтов, указанные в ОДМ 218.3.076-2016, также требуют экспериментального подтверждения с учетом региональных особенностей. Например, в соответствии с рекомендациями ОДМ 218.3.076-2016 капиллярное водонасыщение не должно превышать 6 %.

Обсуждение

В точке максимума 1 на рис. 4 напряжение $\sigma_m = 497,4$ кПа, относительная деформация $\varepsilon_m = 0,0307$. Секущий модуль деформации, определенный как $E_s = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m}$, равен 16,2 МПа. В данном случае секущий модуль E_s определен без разделения общей деформации на упругую и пластическую. Поэтому рассматриваем его как модуль общей деформации (упругой и пластической). Этот модуль обычно называют модулем деформации, он используется в классификациях грунтов и обозначается символом E в ГОСТ 25100-2020. Чем больше модуль деформации, тем меньше осадка грунта. Если

модуль деформации попадает в интервал от 10 до 50 МПа, то по ГОСТ 25100-2020 грунт относится к средне деформируемым, что имеет место в рассмотренном случае ($E \approx E_s = 16,2$ МПа).

Заметим, что вследствие сложности проблемы, различные методики определения модуля деформации могут приводить к неодинаковым значениям оценок. Например, в работе А. С. Прольгина и др. (2022) [19] экспериментально исследован суглинок тяжелый, полутвердый и определены модули деформации по трем методикам. При этом средние значения полученных оценок модуля деформации одного и того же грунта находятся в интервале от 8,4 до 15,0 МПа, в зависимости от способа из определения. В нашем случае более высокое значение приведенной выше оценки (16,2 МПа) можно объяснить влиянием укрепления грунта с добавкой вяжущего не более 2 % и добавками. Таким образом, как и в случае с модулем упругости, модуль деформации превышает рекомендуемые значения и может быть безопасно уменьшен, как минимум, до 15 МПа за счет уменьшения расхода цемента и (или) добавок к местному грунту.

Смежные вопросы, имеющие отношение к теме данной работы, исследованы в работе Е.Г. Хитрова и др. (2020) [20], в которой установлено, что модуль деформации и несущая способность таких грунтов, как пески, супеси, суглинки, лесные почвогрунты тесно взаимосвязаны и описываются степенными функциями. При оперативном контроле состояния опорной поверхности модуль деформации можно определить в полевых условиях, как показано в статье В. К. Катарова и др. (2021) [18]. Исключение, согласно исследованию Хитрова и др. (2020) [20], составляет крупнозернистый песок, модуль деформации и несущая способность которого должны определяться в лаборатории.

Рассмотренная выше нелинейная модель поведения грунта (1) и методика ее применения для определения модуля упругости и связанного с ним модуля деформации дополняет набор инструментов для прогнозирования состояния грунтов земляного полотна в целях повышения качества автомобильных дорог и оптимизации технико-экономических показателей на стадии проектирования, таких как

рассмотренных в работах Е.О. Графовой и др. (2023) [21,22].

Следует отметить, что несмотря на положительный эффект от использования рассмотренных выше стабилизирующих добавок, целесообразны дополнительные исследования, относящиеся к влиянию этих добавок на модули упругости и деформации грунтовой смеси основания дорожной одежды с учетом водонасыщения и уплотнения. В данном направлении прикладных исследований могут быть использованы результаты работы И.И. Леоновича и И.П. Вырко (2013)¹ с учетом местных почвенно-климатических особенностей транспортного освоения лесосырьевой базы юга Республики Карелия.

Заключение

На примере участка автомобильной дороги, построенной в Олонецком районе Республики Карелия, исследовано влияние добавки цемента не более 2 % по массе и модификатора на модуль упругости и модуль деформации грунта земляного полотна автомобильной дороги с учетом рекомендуемых ОДМ 218.3.076-2016 показателей стабилизированных грунтовых смесей для дорожного строительства. Для получения количественных оценок использованы экспериментальные методы и математическое

описание зависимости напряжения от деформаций грунта в виде уравнения (1).

Получены значения модулей упругости и деформации, которые превышают рекомендуемые значения, указанные в ОДМ 218.3.076-2016 и ГОСТ 25100-2020, что подтверждает рабочую гипотезу исследования о технической возможности уменьшения расхода цемента и стабилизатора грунтов, обеспечивая при этом соответствие модулей упругости и деформации нормативным значениям. Таким образом, дополнительное исследование физико-механических свойств местных грунтов для дорожного строительства по рассмотренной методике позволяет получить определенный технико-экономический эффект.

Однако, на стадии подготовки должны быть приняты во внимание и другие характеристики, указанные в ОДМ 218.3.076-2016, которые также требуют экспериментального уточнения с учетом особенностей местных грунтов. Например, в соответствии с рекомендациями ОДМ 218.3.076-2016 капиллярное водонасыщение грунта земляного полотна автомобильной дороги не должно превышать 6 %.

Список литературы

1. Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В. Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду. Лесотехнический журнал. 2023; 2 (50): 179-197. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525091>.
2. Гудков В.В., Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В. Двухосные сочлененные лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости. Лесотехнический журнал. 2022; 4 (48): 77-95. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018835>.
3. Бехтерев Р.А., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Басалаев А.А. Обзор методов стабилизации пучинистых грунтов Кировской области. Инженерный вестник Дона. 2022; 6 (90): 356-374. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49066629>.
4. Дмитриева Т.В., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Безродных А.А., Куцына Н.П. Эффективность стабилизаторов различного состава при укреплении грунтов минеральным вяжущим. Строительные материалы и изделия. 2020; 3 (1): 30-38. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42657334>.

¹Леонович, И.И., Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна. Минск: БНТУ, 2013: 332 с. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/5200>.

5. Kianimehr M., Shourijeh P.T., Binesh S.M., Mohammadinia A., Arulrajah A. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*. 2019; 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792>.
6. Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang Q. Multiscale study of the influence of promoters on low-plasticity clay stabilized with cement-based composites. *Construction and Building Materials*. 2019; 213: 537 – 548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.094>.
7. Кабалин М.Д., Замуруев А.В., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А. Теоретические аспекты укрепления грунта в дорожном строительстве. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2023; 3 (33): 64-74. DOI: <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.13.29.007>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54720068>.
8. Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouinz D. L., Onana V. L. Ex-situ and In-situ Manufacturing Procedures for Optimizing the Characteristics of a Soil Concrete Based on Lateritic Gravels and Granitic Aggregates: Application in Road Construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022; 17 (2): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00231-5>.
9. Sarath Chandra K., Sahile K., Krishnaiah S. Utilization of Red Mud-Fly Ash Reinforced with Cement in Road Construction Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 31. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/3728652>.
10. Jassim N.W., Hassan H.A., Mohammed H.A., Fattah M.Y. Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*. 2022; 14 (2): 100436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100436>.
11. Грачева Ю.В., Тарасева Н.И., Иванов Н.М. Длительная водостойкость модифицированных геосинтетических вяжущих для дорожного строительства. *Региональная архитектура и строительство*. 2021; 1 (46): 63-69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44867750>.
12. Ojuri O.O., Ramdas V., Aderibigbe E.A., Williams C.G., Ramechuran S., Al-Nageim H. Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17: e01319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01319>.
13. Yang B., Li H., Li H., Ge N., Ma G., Zhang H., Zhang X., Zhuang L. Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022; 11 (1): 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.12.002>.
14. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 86 (2): 72–82. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.86.7>.
15. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 58: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09700-8>.
16. Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролыгин А.С. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2024; 2 (96): 290-313. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65735918>.
17. Shekov V., Kolesnikov G. Differential Energy Criterion for Brittle Fracture: Conceptualization and Application to the Analysis of Axial and Lateral Deformation in Uniaxial Compression of Rocks. *Materials*. 2023; 16 (13): 4875. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16134875>.
18. Катаров В.К., Алешина Н.В., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Марков В.И. Оценка уплотненного состояния почвогрунтов при строительстве лесной дороги. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021; 6: С. 106-117. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-106-117>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47326208>.
19. Пролыгин А.С., Александров А.С., Долгих Г.В. Модуль деформации грунтощебеночной смеси для проектирования дорожных одежд. *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство*. 2022; 414-422. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49344736>.

20. Хитров Е.Г., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин. *Resources and Technology*. 2020; 2: 45-79. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2020.5282>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44261048>.

21. Графова Е.О., Степанов А.В., Сюнёв В.С., Катаров В.К. Повышение экологической безопасности трассы Р-21 "КОЛЖА" как центрального элемента лесной инфраструктуры Карелии. *Resources and Technology*. 2023; 1: 112-128. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.6823>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510688>.

22. Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ. *Лесотехнический журнал*. 2023; 2 (50): 5-24. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.

References

1. Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. *Gidromekhanicheskie transmissii lesotransportnyh mashin: tekhnologicheskaya svyaz' s vozdeystviem na pochvenno-rastitel'nyuyu sredu*. [Hydro-mechanical powertrain for timber transport vehicles: technological relationship with the impact on the soil and plant environment]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023; 2 (50): 179-197. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525091>.

2. Gudkov V.V., Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. *Dvuhosnyye sochlenennyye lesotransportnyye mashiny v usloviyah leseki: ocenka primenimosti*. [Biaxial articulated timber vehicles in the conditions of a felling: assessment of applicability]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2022; 4 (48): 77-95. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018835>.

3. Bekhterev R.A., YUrkin YU.V., Avdonin V.V., Basalaev A.A. *Obzor metodov stabilizatsii puchinistyyh gruntov Kirovskoy oblasti*. [Overview of methods for stabilizing heaving soils in the Kirov region]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022; 6 (90): 356-374. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49066629>.

4. Dmitrieva T.V., Markova I.YU., Strokova V.V., Bezrodnih A.A., Kucyna N.P. *Effektivnost' stabilizatorov razlichnogo sostava pri ukreplenii gruntov mineral'nyim vyazhushchim*. [Efficiency of stabilizers of various composition for strengthening the soil with a mineral binder]. *Stroitel'nye materialy i izdeliya = Construction Materials and Products*. 2020; 3 (1): 30-38. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42657334>.

5. Kianimehr M., Shourijeh P.T., Binesh S.M., Mohammadinia A., Arulrajah A. *Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils*. *Construction and Building Materials*. 2019; 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792>.

6. Du Ch., Yang G., Zhang T., Yang Q. *Multiscale study of the influence of promoters on low-plasticity clay stabilized with cement-based composites*. *Construction and Building Materials*. 2019; 213: 537 – 548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.094>.

7. Kabalin M.D., Zamuruev A.V., Kurlykina A.V., Kuznecov D.A. *Teoreticheskie aspekty ukrepleniya grunta v dorozhnom stroitel'stve*. [Theoretical aspects of soil strengthening in road construction]. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki = Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2023; 3 (33): 64-74. DOI: <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.13.29.007>. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54720068>.

8. Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouin D. L., Onana V. L. *Ex-situ and In-situ Manufacturing Procedures for Optimizing the Characteristics of a Soil Concrete Based on Lateritic Gravels and Granitic Aggregates: Application in Road Construction*. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022; 17 (2): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00231-5>.

9. Sarath Chandra K., Sahile K., Krishnaiah S. *Utilization of Red Mud-Fly Ash Reinforced with Cement in Road Construction Applications*. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 31. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/3728652>.

10. Jassim N.W., Hassan H.A., Mohammed H.A., Fattah M.Y. Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*. 2022; 14 (2): 100436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100436>.
11. Gracheva YU.V., Taraseeva N.I., Ivanov N.M. Dlitel'naya vodostojkost' modificirovannyh geosinteticheskikh vyazhushchih dlya dorozhnogo stroitel'stva. [Long-term water resistance of modified geosynthetic binders for road construction]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo = Regional Architecture and Engineering*. 2021; 1 (46): 63-69. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44867750>.
12. Ojuri O.O., Ramdas V., Aderibigbe E.A., Williams C.G., Ramchuran S., Al-Nageim H. Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17: e01319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01319>.
13. Yang B., Li H., Li H., Ge N., Ma G., Zhang H., Zhang X., Zhuang L. Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022; 11 (1): 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.12.002>.
14. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 86 (2): 72–82. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.86.7>.
15. Lunev, A.A., Sirotiyuk, V.V. Prediction of the Stress State of Pond Ash Road Embankments. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 58: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09700-8>.
16. Lytkin A.A., Dolgih G.V., Prolygin A.S. Puti uvelicheniya mezhremontnyh srokov sluzhby avtomobil'nyh dorog. [Ways to increase the inter-maintenance period of roads]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 2 (96): 290-313. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65735918>.
17. Shekov V., Kolesnikov G. Differential Energy Criterion for Brittle Fracture: Conceptualization and Application to the Analysis of Axial and Lateral Deformation in Uniaxial Compression of Rocks. *Materials*. 2023; 16 (13): 4875. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16134875>.
18. Katarov V.K., Aleshina N.V., Syunyov V.S., Rat'kova E.I., Markov V.I. Ocenka uplotnennogo sostoyaniya pochvogrunтов pri stroitel'stve lesnoj dorogi. [Assessment of soil compacted state in forest road construction]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2021; 6: S. 106-117. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-106-117>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47326208>.
19. Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgih G.V. Modul' deformacii gruntoshchebenochnoj smesi dlya proektirovaniya dorozhnyh odezhd. [Soil crushed stone deformation module for road design]. *Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo*. 2022; 414-422. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49344736>.
20. Hitrov E.G., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Issledovanie vzaimosvyazey svojstv pochvogrunтов kak opornyh poverhnostej dvizheniya lesnyh mashin. [Research of interrelations of soil properties as supporting surfaces for forest machinery movement]. *Resources and Technology*. 2020; 2: 45-79. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2020.5282>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44261048>.
21. Grafova E.O., Stepanov A.V., Syunyov V.S., Katarov V.K. Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti trassy R-21 "KOLA" kak central'nogo elementa lesnoj infrastruktury Karelii. [Increasing the environmental safety of the R-21 "KOLA" road as a central element of the Karelian forest infrastructure]. *Resources and Technology*. 2023; 1: 112-128. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.6823>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510688>.
22. Grafova E.O., Syunyov V.S., Gorbach V.V. Analiz faktorov negativnogo vozdeystviya lesozagotovi-tel'nogo proizvodstva na prirodnyuyu sredu Severo-Zapadnogo regiona RF. [The negative impact factor analysis to the environment from logging production on the North-West region of Russian Federation]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023; 2 (50): 5-24. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.

Сведения об авторах

✉ *Степанов Артем Валерьевич* – кандидат технических наук, зав. кафедрой технологии и организации строительства ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>, e-mail: stepanov@petsu.ru.

Катаров Василий Кузьмич – кандидат технических наук, проректор по воспитательной и социальной работе ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>, e-mail: vkatarov@petsu.ru.

Сюнёв Владимир Сергеевич – доктор технических наук, проректор по научно-исследовательской работе ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: siounev@petsu.ru.

Ратькова Елена Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительства ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-946X>, e-mail: ratjkova@mail.ru.

Колесников Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительства ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>, e-mail: kgn@petsu.ru.

Information about the authors

✉ *Artyom V. Stepanov* – Cand. Sci. (Technology), Head of the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>, e-mail: stepanov@petsu.ru.

Vasily K. Katarov – Cand. Sci. (Technology), Vice-Rector for Educational and Social Work, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>, e-mail: vkatarov@petsu.ru.

Vladimir S. Syunev – Dr. Sci. (Technology), Vice-Rector for Research, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: siounev@petsu.ru.

Elena I. Ratkova – Cand. Sci. (Technology), Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-946X>, e-mail: ratjkova@mail.ru.

Gennady N. Kolesnikov – Dr. Sci. (Technology), Professor at the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>, e-mail: kgn@petsu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author