

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/14>

УДК 630 160.2



Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы

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

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

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

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

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

Авторы представляют модель и методику ее применения в прикладном анализе трещинообразования дорожных одежд при вертикальной нагрузке с учетом зависимости от коэффициента Пуассона, влияние которого в известной литературе исследовано недостаточно. Новизна и практическое значение модели и методики заключается в возможности ее использовании для анализа влияния коэффициента Пуассона на относительную глубину трещин в конструкциях дорожных одежд. Результаты расчетов, полученные с использованием данного подхода, позволяют проводить сравнительную оценку влияния стабилизирующих добавок к грунтовым смесям на их трещиностойкость в дорожной конструкции. Кроме того, в данной работе рассматривается механизм локализованного разрушения дорожной одежды и образования выбоин с учетом влияния коэффициента Пуассона. В одном из примеров модель показывает, что если для песчано-гравийной смеси, например, среднее значение коэффициента Пуассона равно 0,25, и все значения коэффициента (с учетом случайных отклонений) попадают в доверительный интервал [0,15...0,35] с надежностью 95%, то при фиксированном сжимающем напряжении 1 МПа прогнозируемая относительная глубина трещины находится в интервале [0,20...0,43]. Кроме того, методика позволяет определить диапазон прогнозируемых нагрузок при фиксированной глубине трещин. Процедура проверки результатов моделирования включает испытания на одноосное сжатие стандартных образцов из распространенных дорожно-строительных материалов и обработку экспериментальных данных по разработанной методике. Анализ полученных результатов с практической точки зрения указывает на потенциальную технико-экономическую эффективность разработки.

Ключевые слова: прочность грунтов, переменность свойств, дорожное полотно, трещинообразование, коэффициент Пуассона, локальное повреждение

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: Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы / А. В. Степанов, В. К. Катаров, В. С. Сюнёв, Г. Н. Колесников // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 217–227. – Библиогр.: с. 224–226 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/14>

Поступила 25.04.2025 Пересмотрена 26.05.2025 Принята 15.09.2025 Опубликовано онлайн 25.09.2025

Modeling the influence of Poisson's ratio on crack formation in the road surface of the forest transport system

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

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

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

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

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

Abstract

The authors present a model and develop a methodology for its application in the applied analysis of crack formation in pavement structures under vertical loading, accounting for Poisson's ratio dependence. The proposed methodology serves as a research tool for analyzing the influence of Poisson's ratio on relative crack depth in pavement constructions. Computational results obtained through this approach enable comparative evaluation of how soil mixture stabilizers affect crack resistance in road structures. Furthermore, this study examines the mechanism of localized pavement failure and pothole formation, considering Poisson's ratio effects. In one example, the model demonstrates that for sand and gravel mixtures with an average Poisson's ratio of 0.25, where all values (taking into account random variations) fall within the confidence interval of [0.15-0.35] at 95% reliability, the predicted relative crack depth ranges from [0.20-0.43] at a fixed compressive stress of 1 MPa. In addition, the methodology defines a range of predicted loads for the specified crack depths. Verification procedures include uniaxial compression testing of standard specimens made from conventional road construction materials, with experimental data processed according to the developed methodology. Practical analysis of the results suggests potential techno-economic benefits of this development.

Keywords: *soil strength, variability of properties, road surface, crack formation, Poisson's ratio, local damage*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Stepanov A. V., Katarov V. K., Syunev V. S., Kolesnikov G. N. (2025). Modeling the influence of Poisson's ratio on crack formation in the road surface of the forest transport system. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 217-227 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/14>

Received 25.04.2025. Revised 26.05.2025. Accepted 15.09.2025. Published online 25.09.2025

Введение

Автомобильные дороги являются важнейшим элементом инфраструктуры, необходимым для социально-экономического развитию регионов. Устойчивое функционирование автомобильных дорог зависит от множества факторов, среди которых ключевую роль играют механические свойства грунтов как основного строительного материала автомобильных дорог. К важнейшим из механических свойств относятся прочность при сжатии, модуль

упругости и модуль деформации грунтов. Эти свойства грунтов как опорных поверхностей движения лесных машин исследовали многие авторы, среди которых А. А. Krivosheev и др. (2025) [1], А. В. Степанов и др. (2024) [2]. Работа V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3] показала, что к числу важнейших характеристик можно отнести также коэффициент Пуассона, влияние которого в объектах дорожного строительства исследовано в меньшей степени, поэтому внимание в данной статье фокусируется на

этом коэффициенте. Для обычно используемых в дорожном строительстве материалов коэффициент Пуассона изменяется в пределах от нуля до 0,5. Например, типичны следующие значения коэффициента Пуассона для гранулированных: сыпучий песок (0,20–0,40), песок средней плотности (0,25–0,40), плотный песок (0,30–0,45), песчано-гравийная смесь (0,15–0,35), связные грунты (~0,50), лед при температуре минус 16°C (0,32).

Коэффициент Пуассона определяет не только соотношение продольных (вертикальных) и поперечных (горизонтальных) относительных деформаций, но и распределение напряжений по тем же направлениям. В зависимости от свойств материала дорожного полотна, таких, как минеральный и гранулометрический состав, влажность и температура, горизонтальные напряжения могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Если сопротивление грунта растяжению низкое, то появляются трещины.

Материалы с низким коэффициентом Пуассона (близким к нулю) имеют меньшую склонность к поперечным (по отношению к линии действия вертикальной нагрузки от собственного веса и давления колес автомобиля) деформациям, что может способствовать снижению риска образования трещин. Однако материалы с низким коэффициентом Пуассона могут быть более хрупкими. Напротив, материалы с высоким коэффициентом Пуассона (близким к 0,5) обладают большей пластичностью, что улучшает их трещиностойкость, но может приводить к избыточным деформациям под нагрузкой и появлению колеи. Таким образом, оптимальное значение коэффициента Пуассона должно соответствовать таким требованиям, как прочность дорожного полотна и его устойчивость к трещинообразованию. Найти оптимальное или компромиссное решение позволяет применение стабилизирующих добавок к грунтам в дорожном строительстве, что рассмотрели в упомянутой выше А. В. Степанов и др. (2024) [2].

Т. к. влияние коэффициента Пуассона на трещинообразование дорожного покрытия исследовано недостаточно детально, то определенный научный интерес представляют результаты, полученных в смежных областях прикладных исследований. В

этой связи заметим, что стабилизированную добавками грунтовую смесь, особенно после промерзания, можно рассматривать как аналог бетона. Влияние комплексных добавок на плотность, прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона исследовали Л. Я. Крамар и др. (2022) [4]. Результаты этого исследования подтверждают отмеченную выше закономерность повышения хрупкости бетона с уменьшением коэффициента Пуассона от 0,24 до 0,18. Следует, однако, учитывать отличительные особенности условий работы дорожной конструкции в регионах с холодным климатом, материал которой в межсезонные периоды при оттаивании более пластичен, но при промерзании тот же материал трансформируется в хрупкий материал. Соответственно, значения коэффициента Пуассона циклически изменяются в течение года под воздействием температуры и влажности. Кроме того, тип грунта может существенно влиять на эффект стабилизации, что следует из работ Wang S. и др. (2022) [5], О. Н. Бурмистровой и др. (2021) [6].

С учетом перечисленных выше условий правомерно предположить, что коэффициент Пуассона для материала дорожной конструкции в каждый момент времени может быть охарактеризован некоторым средним значением и случайным отклонением от среднего значения. Поэтому с физической точки зрения адекватным является использование нормально распределенной величины коэффициента Пуассона при анализе его влияния на трещинообразование дорожного полотна при вертикальной нагрузке. В этом случае характеристики трещин будут также случайными.

Соответственно, целью данной работы является разработка методики для прикладного анализа трещинообразования в дорожном полотне в зависимости от значений коэффициента Пуассона и нагрузки. Разработка такой методики существенно упрощается благодаря относительно небольшому диапазону значений коэффициента Пуассона и наличию хорошо известных подходов к учету влияния случайных факторов в прикладных задачах, что отмечают А. Senova и др. (2023) [7].

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Данная работа является эмпирическим исследованием. Объектом исследования является материал дорожной конструкции, в которой при вертикальной нагрузке от автотранспорта могут появляться трещины.

Предметом исследования являются условия появления трещин и их характеристики в зависимости от значений коэффициента Пуассона и вертикальной нагрузки.

Инструментом исследования является предлагаемая методика моделирования поведения образцов грунта при осевом сжатии. Для проверки точности результатов моделирования использованы известные по литературе данные. Температурные трещины в данной работе не рассматриваются.

Сбор данных

В качестве экспериментальных данных использованы известные по литературе результаты испытаний цилиндрических образцов мерзлого грунта двух типов на одноосное сжатие, диаметр и высота которых равны, соответственно, 61.8 мм × 125 мм и 61.8 мм × 50 мм, согласно Ну F. и др. (2021) [8]. Данные о трещинообразовании в указанных образцах получены нами с использованием модели V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3], которая первоначально предназначалась для анализа поведения хрупких горных пород при одноосном сжатии без учета влияния естественной изменчивости коэффициента Пуассона, предела прочности, модуля упругости и других физико-механических свойств. Анализ результатов применения этой модели при обработке экспериментальных данных показал, что целесообразно дополнить данную модель блоком для учета вероятностных характеристик коэффициента Пуассона перечисленных выше материалов, обычно используемых в дорожном строительстве. В итоге, в рамках данного исследования получена новая модификация модели, отличающаяся дополнительным блоком для анализа влияния вариаций коэффициента Пуассона на трещинообразование грунтов, используемых в дорожном строительстве. Относительно ограничений на область применения этой модификации отметим, что она предназначена для ана-

лиза хрупких или почти хрупких материалов, и неприменима к глинистым грунтам после их оттаивания. В итоге получен инструмент для анализа экспериментальных данных и исследования закономерностей влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в материале для дорожного строительства, что, с практической точки зрения, необходимо для обоснования рекомендаций по улучшению качества и повышению долговечности лесовозных дорог.

Воспроизводимость

Чтобы обеспечить воспроизводимость всех стадий выполненного исследования, мы использовали результаты испытаний, опубликованные другими авторами в открытом доступе в Интернет. Соответствующие ссылки приведены в списке литературы к данной статье.

Новые данные, которые получены по предлагаемой методике в соответствии с целью работы, могут быть воспроизведены после несложных инженерных вычислений по формулам, представленным в данной статье.

Анализ данных

Интерес представляет прогнозирование глубины трещины на дневной поверхности дорожного полотна в зависимости от вертикальной нагрузки. Подобно тому, как о прочности материала судят по результатам испытаний образцов, мы используем образцы стандартной формы для анализа трещинообразования в перечисленных выше материалах для дорожного строительства. Экспериментальные данные для такого анализа можно найти в цитированной выше литературе, однако остаются недостаточно изученными вопросы прогнозирования трещинообразования в зависимости от вертикальной нагрузки.

Относительная глубина трещины на поверхности образца цилиндрической формы при осевом сжатии определяется уравнением из работы V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3]:

$$\frac{t}{R} = \frac{n\sigma_z}{n\sigma_z + \sigma_t^{(peak)}}. \quad (1)$$

В уравнении (1) обозначено: t – глубина трещины; R – радиус образца; σ_z – вертикальное напряжение; $\sigma_t^{(peak)}$ – прочность грунта при растяжении; коэффициент n от коэффициента Пуассона ν :

$$n = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2)$$

Например, согласно Ну Ф. и др. (2021) [8], прочность одной из разновидностей мерзлого грунта при температуре минус 10°C $\sigma_t^{(peak)} = 3,398$ МПа; $\sigma_t^{(peak)} = 0,725$ МПа. σ_z и ν – независимые переменные, которые могут принимать значения из интервалов $\sigma_z = [0, 3,398]$, $\nu = [0, 0,5]$. Для указанной выше песчано-гравийной смеси величина ν предполагается нормально распределенной, с математическим ожиданием, равным 0,25 и среднеквадратическим отклонением, равным 0,05. Таким образом, значения коэффициента Пуассона находятся в доверительном интервале $[0,15, 0,35]$ с достоверностью 95%. Границы этого интервала совпадают с приведенными выше для песчано-гравийной смеси. Результатом моделирования по рассмотренной методике является доверительный интервал для относительной глубины поверхностной трещины при осевом сжатии цилиндрического образца. Вычисления по формулам (1) и (2) и обработка полученных данных могут быть выполнены с использованием модуля “Анализ данных” в MS Excel, включающий стандартный генератор случайных чисел.

Результаты

Результаты вычислений по рассмотренной выше методике с использованием исходных данных, указанных в комментариях к формулам (1) и (2) представлены на Рисунке 1. Точки 4, 5 и 6 соответствуют полному разрушению образца.

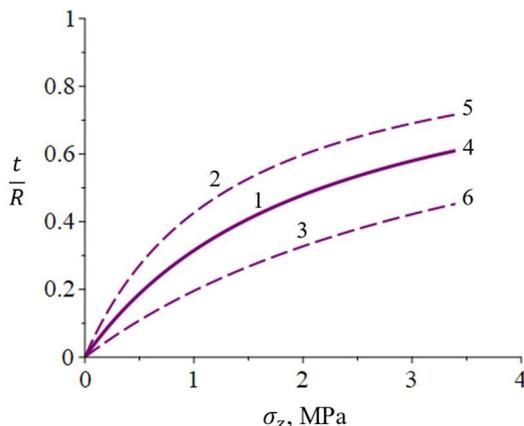


Рисунок 1. Кривые 1, 2 и 3, соответственно, математическое ожидание, верхняя и нижняя границы

доверительного интервала для относительной глубины трещины в зависимости от напряжения σ_z .

Figure 1. Curves 1, 2 and 3 are, respectively, the mathematical expectation, the upper and lower boundaries of the confidence interval for the relative crack depth depending on the stress σ_z .

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Кривые 1, 2 и 3 на Рисунке 1 получены при увязанных выше значениях коэффициента Пуассона, соответственно, 0,25, 0,15 и 0,35. Полному разрушению образца предшествует развитие системы трещин. Анализ данных (Рисунок 1) позволяет получить определенную информацию, о механизме разрушения, важную с точки зрения практики дорожного строительства. Детализируя анализ, рассмотрим Рисунок 2.

Точки 2 и 3 на Рисунке 2 определяют доверительный интервал значений вертикального напряжения $[0,51, 1,75]$ МПа, если относительная глубина трещины равна 0,3. Принимая во внимание естественную неоднородность реальных материалов для дорожного строительства, правомерно предположить, что в наиболее слабом звене трещины могут появиться при относительно небольшой нагрузке (точка 2 на Рисунке 2).

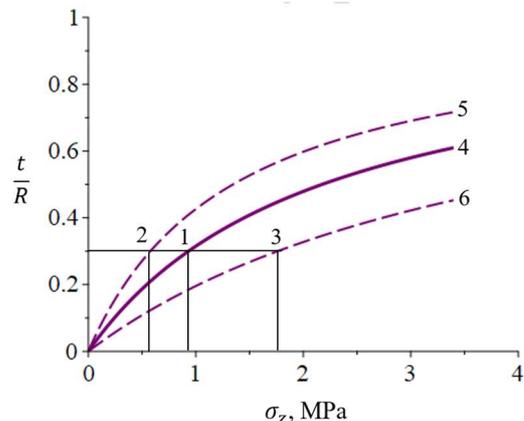


Рисунок 2. К анализу причин возникновения локальных повреждений дорожного покрытия (выбоин)

Figure 2. Towards analysis of the causes of local damage to the road surface (potholes)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition.

Трещины являются концентраторами напряжений, поэтому повторяющаяся нагрузка приведет к

прогрессирующему разрушению, затем к появлению выбоин и необходимости ямочного ремонта. Наблюдения за состоянием автомобильных дорог показывают, что отмеченные причины появления выбоин характерны для всех дорог, построенных из обычно используемых материалов, включая асфальтобетон и модифицированные добавками грунты.

Анализ данных

Используя полученные результаты (Рисунок 1) продолжим анализ причин локального разрушения дорожного полотна. Рассмотрим Рисунок 3. Точки 2 и 3 на Рисунок 3 определяют доверительный интервал значений относительно глубины трещины [0,20, 0,43], если вертикальное напряжение равно 1 МПа. Точки 4, 5 и 6 на Рисунок 2 и 3 соответствуют полному разрушению образца.

Вновь принимая во внимание естественную неоднородность реальных материалов, находим, что при одном и том же относительно небольшом напряжении (1 МПа) могут появиться трещины, глубина которых отличается примерно в два раза (точки 2 и 3 на Рисунок 3).

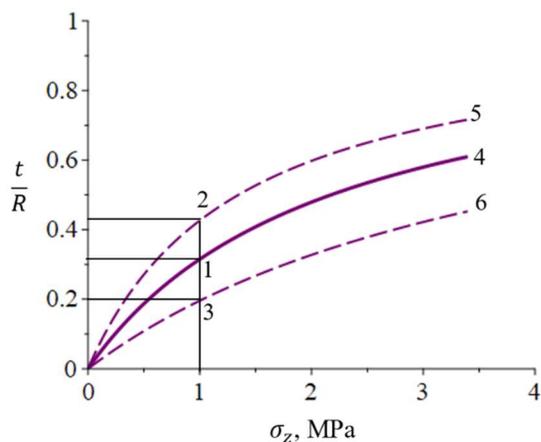


Рисунок 3. К анализу причин возникновения локальных повреждений дорожного покрытия (выбоин)

Figure 3. Towards analysis of the causes of local damage to the road surface (potholes)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition.

Глубина трещины положительно коррелирует с коэффициентом Пуассона при прочих равных условиях. Продолжая анализ причин локальных раз-

рушений дорожного полотна правомерно предположить, что эти разрушения (выбоины) будут появляться и иметь различную глубину при одной и той же нагрузке на дорожное полотно. Уменьшить отрицательные последствия рассмотренных эффектов, вызванных влиянием вариаций коэффициента Пуассона позволяют временные ограничения воздействий на дорожное полотно в межсезонный период, прежде всего в северных регионах.

Целесообразна также разработка и применение модификаторов и добавок для повышения прочности грунтов на растяжение и корректировки (по возможности) коэффициента Пуассона с целью повышения качества дорожных покрытий.

Обсуждение

Представленный выше анализ закономерностей изменения относительной глубины трещины в зависимости от коэффициента Пуассона и нагрузки позволил получить количественные оценки, характеризующие механизм появления трещин в дорожном полотне. Полученные данные не противоречат экспериментальному исследованию образцов грунтов Ф. Ну и др. (2021) [8], которые отмечают, что на стадии после пика напряжения наблюдались явные почти вертикальные трещины растяжения и наклонные трещины сдвига, что типично для хрупких материалов. Это наблюдение согласуется с результатами расчетов по представленной методике, в которой растягивающие напряжения пропорциональны радиусу образца:

$$\sigma_t = n\sigma_z \left(\frac{R}{t} - 1 \right). \quad (3)$$

Уравнение (3) получено из (1) после замены $\sigma_t^{(peak)}$ на σ_t . Под действием возрастающей нагрузки (σ_z) фрагменты образца откалываются от его основной части и условный радиус поперечного сечения уменьшается, что вызывает уменьшение σ_t до предела, при котором рост трещин растяжения прекращается. Однако напряжения сдвига продолжают расти, достигают предела прочности материала при сдвиге (который выше, чем при растяжении) и образец разрушается полностью, что показали упомянутые выше эксперименты Ф. Ну и др. (2021) [8]. Зависимость сжимающего напряжения от деформации для рассмотренного примера приведена на Рисунок 4.

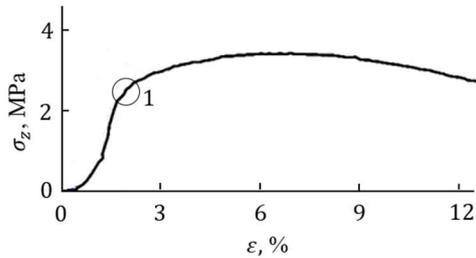


Рисунок 4. Зависимость напряжений от деформаций

Figure 4. Dependence of stresses on deformations

Источник: композиция авторов на основе статьи F. Hu и др. (2021) [8]

Source: author's composition based on article F. Hu и др. (2021) [8]

Маркер 1 на Рисунке 4 обозначает область, в которой напряжение сдвига достигает пороговых значений и появляются трещины сдвига. Таким образом, результаты моделирования в целом согласуются с экспериментами. Однако следует учитывать, что аналогично пороговому значению для напряжений сдвига, существует порог растягивающих напряжений, превышение которого ведет к появлению отмеченных выше трещин растяжения. Это означает, что новые трещины не появляются при любой сколь угодно малой нагрузке, и напряжение σ_z на Рисунках 1-3 соответствует нагрузке, превышающей обозначенный выше предел прочности при растяжении $\sigma_t^{(peak)} = 0,725$ МПа. Детализация этого вопроса может составить предмет дальнейших исследований.

Кроме того, к вопросам для дальнейших исследований могут быть отнесены, такие, как влияние прочности местных грунтов в зависимости от их свойств и влияние технологии дорожного строительства. Другие характеристики грунтов, указанные в ОДМ 218.3.076-2016, как отметили А.А. Лыткин и др. (2024) [9], В. Yang и др. (2022) [10], П. А. Сокол (2023) [11] и др. также требуют продолжения экспериментальных исследований с учетом экологических требований и региональных особенностей, вклад в изучение которых внесли В. К. Катаров и др.

(2021) [12], Ze A. Ngo'o и др. (2022) [13], Р. А. Бехтерев и др. (2022) [14], Е. О. Графова и др. (2023) [15, 16], Р. В. Ryabukhin и др. (2022) [17]. Рассмотренная выше модель и методика анализа локальных разрушений в виде выбоин дополняет набор инструментов для прогнозирования состояния дорожного покрытия в целях повышения качества автомобильных дорог S. Tampekis (2024) [18], K. Piechowicz (2024) [19], J. Xing (2024) [20], L. V. Van. (21) [2024],

Результаты данной работы указывают на потенциальный технико-экономический эффект и целесообразность продолжения исследований материалов и технологий дорожного строительства для повышения их качества с учетом рассмотренного выше влияния коэффициента Пуассона.

Заключение

Предложена модель и разработана методика ее применения для прикладного анализа трещинообразования в дорожном полотне при вертикальной нагрузке в зависимости от коэффициента Пуассона.

С использованием разработанной методики выполнен анализ закономерностей влияния коэффициента Пуассона на относительную глубину трещин в покрытии автомобильной дороги. Результаты вычислений по разработанной методике предназначены для сравнительной оценки сопротивления трещинообразованию материалов, обычно используемых в дорожном строительстве.

С учетом влияния коэффициента Пуассона выполнен анализ механизма локального разрушения дорожного полотна и появления выбоин.

Результаты анализа указывают на возможность получения технико-экономического эффекта за счет уменьшения трещинообразования после дополнительных исследований свойств местных грунтов.

Список литературы

1. Кривошеев, А. А., Швецов, А. С., Бурмистрова, О. Н., Григорьев, И. В., Ревяко, С. И., Охлопкова, М. К. Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах // *Resources and Technology*. – 2024. – Т. 21. – №4, – С. 66–120. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77199521>
2. Степанов А.В., Катаров В.К., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Колесников Г.Н. Влияние стабилизирующих добавок на модули упругости и деформации грунтовой смеси основания дорожной одежды при транспортном освоении лесосырьевой базы юга Республики Карелия. 2024. Т. 14. № 3 (55). С. 222-237. // *Лесотехнический журнал*. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 222–237. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74523776>
3. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure. *Applied Sciences*. 2024; 14(24), 11552. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app142411552>
4. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Погорелов С.Н., Иванов И.М. (2022). Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 35–45. DOI: 10.14529/build220304. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49371654>
5. Wang S., Guo S., Gao X., Zhang P., Li G. Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils. *Bull Eng Geol Environ*. 2022; 81, 264. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>
6. Бурмистрова О.Н., Просужих, А.А., Рудов, С.Е., Куницкая, О.А., Григорьев, И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта. // *Resources and Technology*. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 94-124. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45075548>
7. Senova A., Tobisova A., Rozenberg, R. New Approaches to Project Risk Assessment Utilizing the Monte Carlo Method. *Sustainability*. 2023, 15, 1006. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021006>
8. Hu F., Li Z., Tian Y., Hu R. Failure Patterns and Morphological Soil–Rock Interface Characteristics of Frozen Soil–Rock Mixtures under Compression and Tension. *Applied Sciences*. 2021; 11, 461. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010461>
9. 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>
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. Ngo`o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouinz D. L., Onana V. L. Exsitu 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>.
14. 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>.
15. Графова Е.О., Степанов А.В., Сюнёв В.С., Катаров В.К. Повышение экологической безопасности трассы Р-21 "КОЛИА" 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>
16. 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>
17. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest

management: a case study of the Far East. *Forest Science and Technology*. 2022; 18 (4): 190-200. – DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

18. Tampekis S., Kantartzis A., Arabatzis G., Sakellariou S., Kolkos G., Malesios C. Conceptualizing Forest Operations Planning and Management Using Principles of Functional Complex Systems Science to Increase the Forest's Ability to Withstand Climate Change. *Land*. 2024, 13(2), 217. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land13020217>

19. Piechowicz K., Szymanek S., Kowalski J., Lendo-Siwicka M. Stabilization of Loose Soils as Part of Sustainable Development of Road Infrastructure. *Sustainability*. 2024; 16(9):3592. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su16093592>

20. Xing J., Sun S., Huang Q., Chen Z., Zhou Z. Application of Geoinformatics in Forest Planning and Management. *Forests*. 2024; 15(3):439. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030439>

21. Van L.V., Tung N.T. Dynamic Load Determination of a Multi-purpose Forest Fire Fighting Vehicle When Operating on Forestry Road. *J. Vib. Eng. Technol.* 12, 3507–3517 (2024). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01061-w>

22. Боргонутдинов, А. М., Рудов, С. Е., Григорьев, И. В., Ефимов, Д. С., Швецова, В. В. (2022). Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, (2), 146-158. - DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211757>

References

1. Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Burmistrova O. N., Grigoriev I. V., Revyako S. I., Okhlopkova M. K. *Obosnovanie neobходимosti issledovaniya vozdeystviya valочно-trelyovочно-processornykh mashin na pochvogrunty lesosek na sklonah* [Justification of the need to study the impact of felling-skidding-processing machines on the soil of logging sites on slopes]. *Resources and Technology*. 2024; Vol. 21, No. 42024. №4, pp. 66–120 (in Russ.). - DOI: 10.15393/j2.art.2024.8083

2. Stepanov A. V., Katarov V. K., Syuney V. S., Ratkova E. I., Kolesnikov G. N. (2024). *Vliyanie stabiliziruyushchih dobavok na moduli uprugosti i deformatsii gruntovoy smesi osnovaniya dorozhnoy odezhdyy pri transportnom osvoenii lesosyr'evoy bazy yuga Respubliki Kareliya*. [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 Russ.). - DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/13>.

3. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure. *Applied Sciences*. 2024; 14(24): 11552. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app142411552>

4. Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V., Pogorelov S.N., Ivanov I.M. *Struktura cementnogo kamnya s kompleksnymi dobavkami i ee vliyanie na deformatsionnye svoystva betonov* [The Structure of Cement Stone with Complex Additives and its Effect on the Deformation Properties of Frame Concrete]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 3, pp. 35–45. (in Russ.). - DOI: 10.14529/build220304

5. Wang S., Guo S., Gao X., Zhang P., Li G. Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils. *Bull Eng Geol Environ*. 2022; 81, 264. - DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>

6. Burmistrova O.N., Prosuzhikh, A.A., Rudov, S.E., Kunickaya, O.A., Grigor'ev, I.V. *Eksperimental'nye issledovaniya proizvoditel'nosti forvardera s uchetom ego ekspluatatsionnykh harakteristik, parametrov lesoseki, i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvogrunta*. [Experimental studies of forwarder performance taking into account its operational characteristics, cutting area parameters, and physical and mechanical properties of soil] // *Resources and Technology*. 2021, 18, no 1, pp. 94-124. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45075548>

7. Senova A., Tobisova A., Rozenberg, R. New Approaches to Project Risk Assessment Utilizing the Monte Carlo Method. *Sustainability*. 2023, 15, 1006. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021006>.

8. Hu F., Li Z., Tian Y., Hu R. Failure Patterns and Morphological Soil–Rock Interface Characteristics of Frozen Soil–Rock Mixtures under Compression and Tension. *Applied Sciences*. 2021; 11, 461. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010461>

9. Lytkin A.A., Dolgih G.V., Prolygin A.S. *Puti uvelicheniya mezhremontnykh srokov sluzhby avtomobil'nykh dorog*. [Ways to increase the inter-maintenance period of roads]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'nodorozhnogo 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>.

10. 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>

11. Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. *Gidromekhanicheskie transmissii lesotransportnykh 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>

12. 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>.

13. Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouinz D. L., Onana V. L. Exsitu 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>

14. Bekhterev R.A., YUrkin YU.V., Avdonin V.V., Basalaeв A.A. *Obzor metodov stabilizacii puchinistyh grunтов Kirovskoj 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>.

15. 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>.

16. Grafova E.O., Syunyov V.S., Gorbach V.V. *Analiz faktorov negativnogo vozdejstviya 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>.

17. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East. *Forest Science and Technology*. 2022; 18 (4): 190-200. - DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

18. Tampekis S., Kantartzis A., Arabatzis G., Sakellariou S., Kolkos G., Malesios C. Conceptualizing Forest Operations Planning and Management Using Principles of Functional Complex Systems Science to Increase the Forest's Ability to Withstand Climate Change. *Land*. 2024; 13(2):217. - DOI: <https://doi.org/10.3390/land13020217>

19. Piechowicz K., Szymanek S., Kowalski J., Lendo-Siwicka M. Stabilization of Loose Soils as Part of Sustainable Development of Road Infrastructure. *Sustainability*. 2024; 16(9):3592. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su16093592>

20. Xing J., Sun S., Huang Q., Chen Z., Zhou Z. Application of Geoinformatics in Forest Planning and Management. *Forests*. 2024; 15(3):439. - DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030439>

21. Van L.V., Tung N.T. Dynamic Load Determination of a Multi-purpose Forest Fire Fighting Vehicle When Operating on Forestry Road. *J. Vib. Eng. Technol.* 12, 3507–3517 (2024). - DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01061-w>

22. Borgonutdinov, A.M., Rudov, S.E., Grigoriev, I. V., Efimov, D. S., Shvetsova, V. V. (2022). Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo rezhima v sloyah dorozhnogo pokrytiya magistral'nyh lesovoznyh dorog. [Experimental studies of the thermal regime in the road surface layers of main logging roads]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine.]* (2), 146-158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211757>

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@petsru.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@petsru.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@petsru.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@petsru.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: iounev@petsu.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