

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4742

УДК 625.711.84:51-74

Статья

Прочность и модуль упругости мёрзлых песчаных грунтов как материала лесозаготовительной дороги

Константин В. Хорошилов¹, Василий К. Катаров¹, Тиммо А. Гаврилов¹
и Геннадий Н. Колесников^{1,*}

¹ Петрозаводский государственный университет, Российская Федерация, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 29; E-Mails: ale-ks-na@yandex.ru (К. Х.); vkatarov@petrsu.ru (В. К.); gtimmo@mail.ru (Т. Г.); kgn@petrsu.ru (Г. К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; kgn@petrsu.ru (Г. К.); Tel.: +7-814-2-76-64-25

Получена: 4 августа 2019 / Принята: 27 сентября 2019 / Опубликовано: 28 сентября 2019

Аннотация: Среди проблем развития лесного комплекса России важное место занимает проблема улучшения сети лесных дорог. Задачи совершенствования технологий дорожного строительства были изучены авторами многих работ, в которых получен ряд важных результатов. Однако вопросы прочности талых и мёрзлых грунтов как материалов лесных дорог требуют дальнейших исследований. Цель данной работы: разработать методику косвенного определения модуля упругости и растягивающих напряжений мёрзлого грунта по результатам испытаний на трёхточечный изгиб балки с развивающейся трещиной. В ходе исследования испытывались образцы в виде балок с прямоугольным поперечным сечением шириной 55 мм и высотой 39 мм. Пролёт балки 280 мм. Материал балки: песчаный грунт при температуре $-4,6$ °С. На основе анализа испытаний разработана математическая модель для определения модуля упругости материала балки и оценки растягивающих напряжений в сечении с трещиной. Испытания и результаты математического моделирования подтвердили, что разрушение балки из песчаного грунта с развивающейся трещиной соответствует нисходящей ветви диаграммы «нагрузка — перемещение». Результаты работы дополняют сложившееся понимание функционирования мёрзлого песчаного грунта в дорогах с нежёсткой поверхностью и могут быть использованы при анализе состояния и обосновании рекомендаций по совершенствованию технологии строительства лесных дорог.

Ключевые слова: песчаный грунт; испытания; трёхточечный изгиб; трещины; математическое моделирование.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4742

Article

Strength and Elastic Modulus of Frozen Sandy Soil as a Material for a Logging Road

Konstantin V. Khoroshilov¹, Vasily K. Katarov¹, Timmo A. Gavrilov¹
and Gennady N. Kolesnikov^{1,*}

¹ Petrosavodsk State University, Russian Federation, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, pr. Lenina, 29; E-Mails: ale-ks-na@yandex.ru (K. Kh.); vkatarov@petrstu.ru (V. K.); gtimmo@mail.ru (T. G.); kgn@petrstu.ru (G. K.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: kgn@petrstu.ru (G. K.); Tel.: +7-814-2-76-64-25

Received: 4 August 2019 / Accepted: 27 September 2019 / Published: 28 September 2019

Abstract: The problem of forest roads improvement is relevant nowadays. The issues of strength of thawed and frozen soils as the materials of forest roads require further research. The article is aimed at the problem of developing a technique for indirect determination of elastic modulus and tensile stresses in frozen soil. It is based on the results of tests on three-point bending of a beam with a developing crack. The authors used methods of experimental and theoretical studies of mechanical systems. Testing was performed with samples in the form of beams with a cross section in the form of a rectangle 55 mm wide and 39 mm high. The span of the beam was 280 mm. The beam material was sandy soil at a temperature of minus 4.6 °C. Three-point bending tests were performed using of test-machine. Based on the analysis of tests a mathematical model is developed to determine the elastic modulus of the beam material and to estimate the tensile stresses in the section with a crack. Tests and results of mathematical modeling confirmed that the destruction of the beam from sandy soil with an evolving crack corresponds to the downward branch of the diagram "load – displacement". The results of the work complement the current understanding of frozen sandy soil functioning and can be used in assessing the status and substantiating recommendations for improving forest road construction technologies.

Keywords: sandy soil; tests; three-point bending; cracks; mathematical modeling.

1. Введение

В совокупности проблем развития лесного комплекса России важное место занимает проблема совершенствования лесных дорог, которая остаётся актуальной на протяжении длительного времени. Анализ современного состояния комплекса проблем и ориентиры на ближайшие 10 лет содержатся в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. В Стратегии (с. 38, 72) определено, что особое значение для повышения экономической доступности лесов и их промышленного использования, восстановления и охраны (включая защиту от лесных пожаров) имеет лесная инфраструктура и, прежде всего, плотность лесных дорог. Соответственно, для решения появляющихся в этой связи задач Стратегией (с. 39) предусмотрено внедрение новых технологий при строительстве лесных дорог.

Задачи совершенствования технологий строительства дорог исследовались авторами многих работ, в которых получен ряд важных результатов [1—7]. Однако требуют продолжения исследований вопросы, относящиеся к определению прочности талых и мёрзлых грунтов как материалов лесных дорог. Недостаточно изученными являются вопросы прочности при растяжении верхнего слоя лесозаготовительной дороги, что особенно актуально для регионов с холодным климатом [8—10].

Известно, что в зимний период температурные деформации верхнего слоя автомобильной дороги сопровождаются появлением растягивающих напряжений и при недостаточной прочности материала могут появиться морозобойные трещины [1], [8]. Прямые измерения растягивающих напряжений в грунте являются технически сложными, поэтому целесообразно применение соотношений между этими напряжениями и модулем упругости, который может быть определён более простыми способами. Однако вопрос о модуле упругости многослойной дорожной одежды остаётся в настоящее время дискуссионным [12].

Лесные дороги относятся к классу автомобильных дорог с нежёсткими дорожными одеждами. Опыт исследований в области проектирования нежёстких дорожных одежд обобщён в нормативных документах, действующих по состоянию на 01.08.2019 (docs.cntd.ru): СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства; СП 318.1325800.2017. Дороги лесные. Правила эксплуатации; ОДН 218.046-01. Проектирование нежёстких дорожных одежд.

Механические свойства мёрзлых грунтов (модуль упругости, прочность и другие характеристики) имеют ключевое значение в проектах лесозаготовительных дорог в связи с тем, что основной объём вывозки леса приходится на зимний период вследствие недостаточной сети дорог, функционирующих в течение всего года [6], [7], [12], [13]. При строительстве лесных дорог обычно используют местные материалы в виде подходящих по своим свойствам грунтов [14].

Механические свойства грунтов могут быть определены как прямыми, так и косвенными методами. Необходимость продолжения исследований в данном направлении диктуется тем, что прямые методы определения прочности и модуля упругости мёрзлых и талых грунтов

технически сложны, а косвенные методы не всегда достаточно точны [15], [16]. Современное состояние исследований механических свойств мёрзлых грунтов отражено, например, в работах [17], [18]. Прочность мёрзлого грунта при растяжении может быть определена по результатам испытаний на трёх- или четырёхточечный изгиб и другими способами [19]. Для определения модуля упругости грунта в полевых условиях может быть использован, например, пенетрометр ПСГ-МГ4, если температура окружающего воздуха находится в интервале от нуля до 50 °С. Таким образом, возможности анализа прочности мёрзлых грунтов ограничены, однако необходимость уточнения их характеристик для использования в инженерных задачах мотивирует продолжение исследований в данной области [1], [5], [11], [20]. Из всего множества разновидностей грунтов как местных материалов для строительства лесовозных дорог дальнейшее изложение фокусируется на песчаных грунтах, включая песчано-гравийные смеси природного происхождения и смеси песка и щебня по ГОСТ 23735-2014.

Цель работы: разработка методики для косвенного определения модуля упругости мёрзлого песчаного грунта и растягивающих напряжений по результатам испытаний на трёхточечный изгиб балки с развивающейся трещиной.

2. Материалы и методы

В работе использованы методы экспериментальных и теоретических исследований механических систем с применением методов математического моделирования.

Объект исследования — образец в виде балки с прямоугольным поперечным сечением шириной 55 мм, высотой 39 мм и длиной 320 мм. Пролёт балки равен 280 мм. Материал балки — замороженный песчаный грунт. Подготовка образцов производилась по аналогии с работой [21]. Образцы, опоры и устройство для передачи нагрузки показаны на рисунке 1. Температура материала на поверхности разрушения образцов измерялась бесконтактным способом с помощью пирометра. Для рассматриваемого далее образца температура на поверхности разрушения была равна $-4,6$ °С.

В данной работе была использована испытательная машина SHIMADZU AGS-X, для которой допустимые пределы относительной погрешности составляют 1,0 %. Испытания выполнены при скорости перемещения загрузочного устройства 5 мм/мин. Диаграмма зависимости «нагрузка — величина прогиба в середине пролёта» строилась автоматически. Для обработки результатов механических испытаний были использованы стандартные методы математического моделирования.

После испытания до разрушения при изгибе и оттаивания измеряли содержание влаги в материале образцов с помощью анализатора влажности SHIMADZU MOC-120H при температуре в сушильной камере анализатора 105 °С. Уменьшение содержания влаги в образце во время сушки контролировалось автоматически с точностью 0,01 % (по массе) каждые 30 с. В итоге относительная влажность материала рассматриваемого далее образца составила 10,89 %, что соответствует абсолютной влажности 12,22 %.

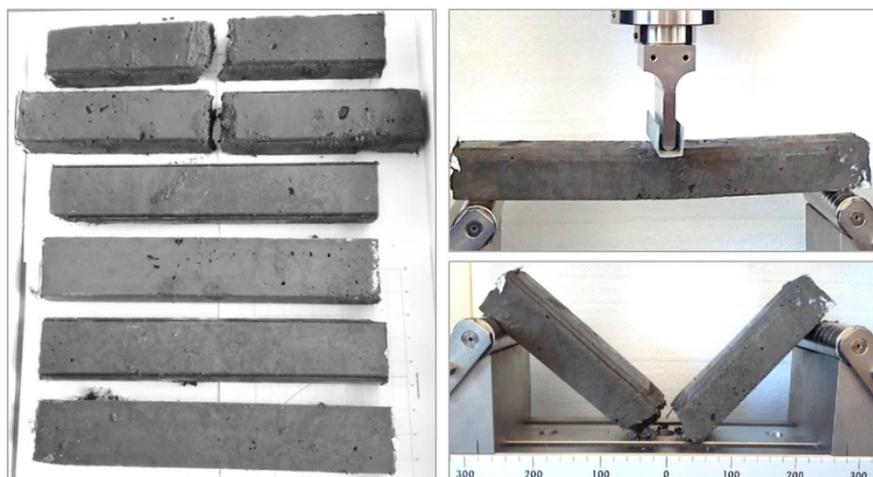


Рисунок 1. Образцы до, после и в процессе испытаний
Figure 1. The specimen before, after, and during testing

Формальный анализ результатов испытаний показал, что соотношение «нагрузка — вертикальное перемещение в середине пролёта» аппроксимируется в EXCEL полиномом (линией тренда) четвёртой степени с коэффициентом детерминации $R^2 = 1,00$, что означает функциональную зависимость между переменными и указывает на существование латентно существующего аналитического соотношения между нагрузкой и перемещением. Практическое значение данного соотношения заключается в возможности его использования для моделирования и прогнозирования мёрзлого грунта с учётом появления трещин. Чтобы найти это соотношение, выполним анализ представленной задачи по существу, используя экспериментальные данные и их математическую обработку.

3. Результаты

Полученные при испытаниях данные одного из указанных выше образцов (рисунок 1) показаны маркерами на рисунке 2.

Как отмечено выше, нелинейный характер зависимости «нагрузка — перемещение» объясняется влиянием трещин, которые появляются в растянутой зоне балки. При испытаниях до разрушения визуально фиксировалась одна трещина в середине пролёта балки. Наблюдалось возрастание длины и ширины трещины с увеличением прогиба балки.

Разрушение балки происходило на нисходящей ветви диаграммы «нагрузка — перемещение». С точки зрения механики это означает, что экстремум растягивающего напряжения достигается после прохождения экстремума силы. Данное явление объясняется влиянием роста трещины и, соответственно, уменьшением неповреждённой части поперечного сечения балки.

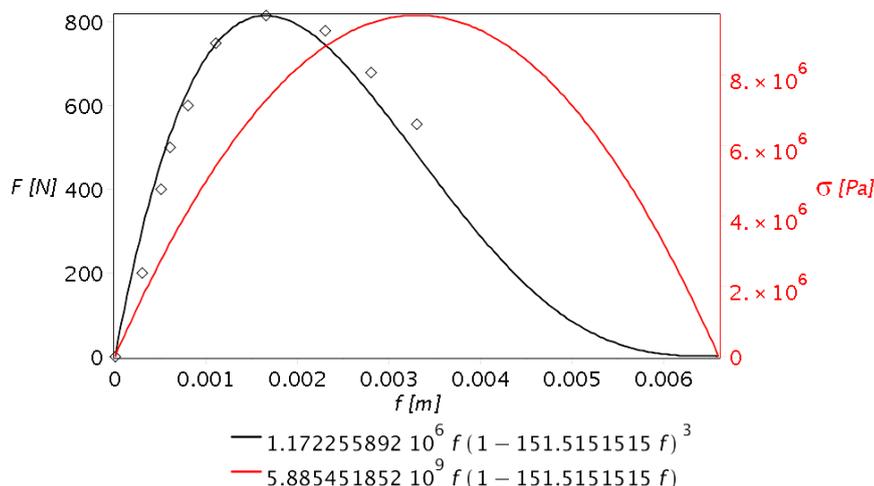


Рисунок 2. Результаты испытаний и математического моделирования
Figure 2. Test Results and of mathematical modeling

Рассмотрим математическое описание данного явления, принимая во внимание, что с увеличением нагрузки F на балку по рисунку 1 трещина появляется в нижней части её поперечного сечения, причём берега трещины ориентированы по нормали к направлению действия растягивающих напряжений σ_1 .

Пусть H_0 — высота поперечного сечения балки, f — указанный на рисунке 2 прогиб балки, h — длина трещины:

$$h = K_1 \cdot H_0 \cdot f, \quad (1)$$

где K_1 — параметр модели, учитывающий появление трещин. Тогда высота неповреждённой части поперечного сечения

$$H = H_0 - h = H_0 \cdot k, \quad (2)$$

где $k = 1 - K_1 \cdot f$.

Эксперименты показали, что соотношение «нагрузка — перемещение» с достаточной точностью может быть представлено в виде

$$F = 48 \cdot f \cdot E \cdot I^* / L^3, \quad (3)$$

где $I^* = B \cdot H^3 / 12$ — момент инерции поперечного сечения с трещиной, E — модуль упругости материала балки, L — пролёт балки.

В формуле (3) величину I^* можно рассматривать как эффективный момент инерции поперечного сечения балки, т. е. как момент инерции сечения с повреждением в виде трещины длиной h (1).

Принимая во внимание соотношения (1) и (2), преобразуем (3). Получим функцию $F(f)$ в виде полинома третьей степени. Отвечающий физическому смыслу задачи экстремум данной функции достигается, если $f = f_{extr_F}$:

$$f_{extr_F} = 0,25 / K_1. \quad (4)$$

Из соотношения (4) найдём K_1 , используя полученное при испытаниях значение f_{extr_F} . Тогда, зная K_1 , можно получить функцию $F_{extr}(E)$. Используя найденное при испытаниях значение экстремума данной функции, определим модуль упругости материала балки E .

Чтобы найти наибольшее растягивающее напряжение в поперечном сечении с трещиной, воспользуемся известной из прикладной механики формулой, в которой, однако, будем использовать эффективный момент сопротивления W^* :

$$\sigma = M / W^*, \quad (5)$$

где $M = P \cdot L / 4$ — изгибающий момент, $W^* = B \cdot H^2 / 6$ — момент сопротивления сечения с повреждением в виде трещины длиной h (1).

С учётом выражений (1) и (2), используя найденное значение коэффициента K_1 , запишем после преобразований правую часть формулы (3) в виде полинома второй степени. Экстремуму σ соответствует $f = f_{extr_σ}$:

$$f_{extr_σ} = 0,5 / K_1. \quad (6)$$

Из формул (4) и (6) следует, что $f_{extr_σ} = 2 \cdot f_{extr_F}$, т. е. результатами математического моделирования механического состояния балки с эволюционирующей трещиной подтверждено сформулированное выше предположение, что экстремум растягивающего напряжения достигается после прохождения экстремума силы.

Результаты испытаний и моделирования показаны на рисунке 2 в графическом виде.

Используя представленную выше методику анализа механического состояния балки с эволюционирующей трещиной на нагрузке, можно показать, что в рамках использованной модели при $F = F_{extr}$ длина трещины $h = h_{extr_F} = 0,25 \cdot H_0$. Если $\sigma = \sigma_{extr}$, то длина трещины $h = h_{extr} = 0,5 H_0$. При этом теоретически

$$\sigma_{extr} = 3 \cdot E \cdot H_0 / (2 K_1 \cdot L^2). \quad (7)$$

По результатам обработки экспериментальных данных (рисунки 1 и 2) $\sigma_{extr} = 0,764 \cdot E / K_1$.

Из равенства (7), в котором K_1 — постоянная величина, следует важный для практики вывод: максимальное напряжение, а значит, и прочность материала дороги прямо пропорциональны модулю упругости. Данный вывод не противоречит практике использования модуля упругости при оценке прочности дорожных одежд как в нормах ОДН 218.046-01, так и в научных исследованиях [1], [11], [15], [17].

4. Обсуждение и заключение

Выше рассмотрена методика определения модуля упругости мёрзлого грунта. Величину модуля упругости талого грунта, который ещё сохраняет определённую прочность при небольшой неотрицательной температуре, можно определить по рассмотренной выше методике, а также с помощью пенетрометра или иным способом [1], [15].

Значения модуля упругости нежесткой дорожной одежды регламентированы в упомянутых выше нормах ОДН 218.046-01, п. 3.26. Согласно нормам, в зависимости от категории дороги минимальные значения модуля упругости должны находиться в интервале от 50 до 230 МПа.

По результатам рассмотренных выше испытаний при температуре $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ получено значение модуля упругости мерзлого песчаного грунта $E = 1972\text{ МПа}$ и максимум растягивающего напряжения $\sigma_{extr} = 9,71\text{ МПа}$.

С понижением температуры модуль упругости и прочность грунта возрастают. Например, если при нормальных условиях модуль упругости слоя из песчаного грунта равен 125 МПа, а песчано-гравийного слоя — 230 МПа, то в зимний период эти значения могут возрастать до 10000 МПа [1]. Этим данным для климатических условий Казахстана (где температура может снижаться до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) не противоречит полученное выше значение $E = 1972\text{ МПа}$ (при температуре материала $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Адекватность полученных данных подтверждена также в рассмотренных выше испытаниях (рисунки 1 и 2).

Таким образом, в качестве заключения следует отметить следующее.

На основе анализа испытаний образцов мерзлого грунта на изгиб (рисунок 1), а также с использованием элементов механики разрушения разработана модель для определения модуля упругости материала образца и оценки растягивающих напряжений в сечении с трещиной. В модели использован эффективный момент инерции, в котором эволюция трещины учитывается параметром модели K_1 (1).

Адекватность разработанной методики и достоверность результатов моделирования подтверждены экспериментально (рисунок 1) и не противоречат известным по литературе результатам [1].

Отличительная особенность разработанной модели разрушения заключается в использовании аналитических зависимостей, полученных как результат математического описания состояния балки с эволюционирующей трещиной и описывающих полный процесс деформирования (рисунок 2).

Испытаниями и результатами механико-математического моделирования (б) подтверждено, что разрушение балки из песчаного грунта с эволюционирующей трещиной соответствует нисходящей ветви диаграммы «нагрузка — перемещение» (рисунок 2).

Таким образом, результаты работы дополняют существующие представления о функционировании дорог с жестким покрытием и могут быть использованы при анализе состояния и обосновании рекомендаций по совершенствованию технологий строительства лесных дорог.

Дальнейшие исследования по теме работы могут быть ориентированы на адаптацию предложенного подхода к анализу состояния других материалов с трещинами, разрушение которых происходит на нисходящей ветви диаграммы «нагрузка — перемещение».

Список литературы

1. *Teltayev B. B., Liu J., Suppes E. A.* Distribution of temperature, moisture, stress and strain in the highway // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 83, № 7. P. 102—113. DOI: 10.18720/MCE.83.10.
2. *Бурмистрова О. Н., Бурмистров В. А., Сушков С. И., Болотских Л. В.* Выбор способов и средств строительства автомобильных дорог и инженерных сооружений. Ухта, 2019. 80 с.
3. *Подольская Е. С., Ковганко К. А., Ершов Д. В., Шуляк П. П., Сучков А. И.* Использование модели транспортной сети региона для оценки времени и расстояния наземной доставки сил и средств до лесных пожаров // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2, № 1. С. 1—28.
4. *Смирнов М. Ю., Чернякевич В. И.* Технологическая модернизация строительства лесных дорог // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 1 (37). С. 35—43.
5. *Ратькова Е. И., Сюнёв В. С., Катаров В. К.* Воздействие циклов «замораживание — оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии // Resources and Technology. 2013. Т. 10, № 1. С. 73—89.
6. *Соколов А. П., Сюнёв В. С.* Оптимизационная модель синтеза транспортного плана перевозок древесины // Resources and Technology. 2016. Т. 13, № 1. С. 1—22.
7. *Прокопьев Е. А., Рослякова Н. А., Рязанцев П. А.* Влияние климата на объёмы вывозки древесины в Республике Карелия // Друкеровский вестник. 2017. № 5. С. 173—185.
8. *Merzlyakov V. P.* Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53, № 4. P. 221—225.
9. *Бурмистрова О. Н., Бургонутдинов А. М., Пильник Ю. Н.* Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в умеренно-континентальном климате // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 4 (24). С. 133—138.
10. *Колесников Г. Н., Гаврилов Т. А.* Моделирование условий появления низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 56. С. 57—66.
11. *Красиков О. А.* О вычислении среднего модуля упругости многослойной дорожной одежды при расчёте её по критериям сдвига и растяжения при изгибе // Дороги и мосты. 2014. № 2 (32). С. 70—80.
12. *Шегельман И. Р., Лукашевич В. М.* Оценка сезонности при подготовке лесозаготовительного производства // Фундаментальные исследования. 2011. № 12 (3). С. 599—603.
13. *Мохирев А. П., Горяева Е. В., Мохирев М. П., Ившина А. В.* Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных // Лесотехнический журнал. 2018. № 2. С. 176—185.
14. *Смирнов М. Ю., Скрыпников А. В., Логачев В. Н., Чернышова Е. В., Логойда В. С., Ломакин Д. В.* Использование укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесных дорог: Монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. 169 с.
15. *Uglova E. V., Tiraturyan A. N., Liapin A. A.* Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing // PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. № 2. P. 111—130. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.08.
16. *Zhao Y., Si B.* Thermal properties of sandy and peat soils under unfrozen and frozen conditions // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 189. P. 64—72.
17. *Ming F., Li D., Zhang M., Zhang Y.* A novel method for estimating the elastic modulus of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2017. Vol. 141. P. 1—7.

18. *Chang D., Lai Y., Gao J.* An investigation on the constitutive response of frozen saline coarse sandy soil based on particle breakage and plastic shear mechanisms // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 159. P. 94—105.
19. *Yamamoto Y., Springman S. M.* Three- and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0° C // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 134. P. 20—32.
20. *Рудов С. Е., Шануро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Особенности взаимодействия трелёвочной системы с оттаивающим почвогрунтом // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2019. Т. 23, № 1. С. 52—61.
21. *Aksenov V. I., Gevorkyan S. G., Doroshin V. V.* Dependence of Strength and Physical Properties of Frozen Sands on Moisture Content. // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018. Vol. 54, № 6. P. 420—424.
22. *Liu D., He M., Cai M.* A damage model for modeling the complete stress-strain relations of brittle rocks under uniaxial compression // *International Journal of Damage Mechanics*. 2018. Vol. 27, № 7. P. 1000—1019.

References

1. *Teltayev, B. B.* Distribution of temperature, moisture, stress and strain in the highway / B. B. Teltayev, J. Liu, E. A. Suppes // *Magazine of Civil Engineering*. — 2018. — Vol. 83, № 7. — P. 102—113. — DOI: 10.18720/MCE.83.10.
2. Choice of ways and means of construction of roads and engineering structures. / O. N. Burmistrova, V. A. Burmistrov, S. I. Sushkov, L. V. Bolotskix // *Uxta*, 2019. — 80 p. (In Russ.)
3. Using the model of the transport network of the region to estimate the time and distance of ground delivery of forces and means to forest fires / E. S. Podol'skaya, K. A. Kovganko, D. V. Ershov, P. P. Shulyak, A. I. Suchkov // *Issues of forest science*. — 2019. — Vol. 2, № 1. — P. 1—28. (In Russ.)
4. *Smirnov, M. Yu.* Technological modernization of forest roads construction / M. Yu. Smirnov, V. I. Chernyakevich // *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*. — 2018. — Vol. 6, № 1 (37). — P. 35—43. (In Russ.)
5. *Rat'kova, E. I.* Effect of freeze — thaw cycles on deformation properties of forest soils in Karelia / E. I. Rat'kova, V. S. Syunyov, V. K. Katarov // *Resources and Technology*. — 2013. — Vol. 10, № 1. — P. 73—89. DOI: 10.15393/j2.art.2013.2241 (In Russ.)
6. *Sokolov, A. P.* Optimization model of synthesis of transport plan of wood transportation / A. P. Sokolov, V. S. Syunyov // *Resources and Technology*. — 2016. — Vol. 13, № 1. — P. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2016.3201 (In Russ.)
7. *Prokop`ev, E. A.* Climate influence on timber export volumes in the Republic of Karelia / E. A. Prokop`ev, N. A. Roslyakova, P. A. Ryazancev // *Drucker's Herald*. — 2017. — № 5. — P. 173—185. (In Russ.)
8. *Merzlyakov, V. P.* Physical and mechanical conditions for primary frost crack formation / V. P. Merzlyakov // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — 2016. — Vol. 53, № 4. — P. 221—225.
9. *Burmistrova, O. N.* Mechanism of formation of frost cracks on roads operated in temperate continental climate / O. N. Burmistrova, A. M. Burgonutdinov, Yu. N. Pil'nik // *Forestry engineering journal*. — 2016. — Vol. 6, № 4 (24). — P. 133—138. (In Russ.)
10. *Kolesnikov, G. N.* Modeling of conditions of occurrence of low-temperature cracks in the asphalt concrete layer of the road / G. N. Kolesnikov, T. A. Gavrilov // *Bulletin of Tomsk state University. Mathematics and mechanics*. — 2018. — № 56. — P. 57—66. (In Russ.)

11. *Krasikov, O. A.* On the calculation of the average modulus of elasticity of multilayer pavement when calculating it by the criteria of shear and tensile bending / O. A. Krasikov // Roads and bridges. — 2014. — № 2 (32). — P. 70—80. (In Russ.)
12. *Shegel`man, I. R.* Assessment of seasonality in the preparation of logging production / I. R. Shegel`man, V. M. Lukashevich // Fundamental study. — 2011. — № 12 (3). — P. 599—603. (In Russ.)
13. *Moxirev, A. P.* Planning of winter logging roads service life on the basis of analysis of climate data statistics / A. P. Moxirev, E. V. Goryaeva, M. P. Moxirev, A. V. Ivshina // Forestry engineering journal. — 2018. — № 2. — P. 176—185. (In Russ.)
14. The use of fortified soils, local materials and industrial waste for the construction of road and forest roads : [monograph] / M. Yu. Smirnov, A. V. Skry`nikov, V. N. Logachev, E. V. Cherny`shova, V. S. Logojda, D. V. Lomakin. — Joshkar-Ola : PGTU, 2017. — 169 p. (In Russ.)
15. *Uglova, E. V.* Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing / E. V. Uglova, A. N. Tiraturyan, A. A. Liapin // PNRPU Mechanics Bulletin. — 2016. — № 2. — P. 111—130. — DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.08.
16. *Zhao, Y.* Thermal properties of sandy and peat soils under unfrozen and frozen conditions / Y. Zhao, B. Si // Soil and Tillage Research. — 2019. — Vol. 189. — P. 64—72.
17. A novel method for estimating the elastic modulus of frozen soil / F. Ming, D. Li, M. Zhang, Y. Zhang // Cold Regions Science and Technology. — 2017. — Vol. 141. — P. 1—7.
18. *Chang, D.* An investigation on the constitutive response of frozen saline coarse sandy soil based on particle breakage and plastic shear mechanisms / D. Chang, Y. Lai, J. Gao // Cold Regions Science and Technology. — 2019. — Vol. 159. — P. 94—105.
19. *Yamamoto, Y.* Three- and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0° C / Y. Yamamoto, S. M. Springman // Cold Regions Science and Technology. — 2017. — Vol. 134. — P. 20—32.
20. Features of interaction of skidding system with thawing soil / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor`ev, O. A. Kuniczkaya, O. I. Grigor`eva // Forestry Bulletin. — 2019. — Vol. 23, № 1. — P. 52—61. (In Russ.)
21. *Aksenov, V. I.* Dependence of Strength and Physical Properties of Frozen Sands on Moisture Content. / V. I. Aksenov, S. G. Gevorkyan, V. V. Doroshin // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2018. — Vol. 54, № 6. — P. 420—424.
22. *Liu, D.* A damage model for modeling the complete stress-strain relations of brittle rocks under uniaxial compression / D. Liu, M. He, M. Cai // International Journal of Damage Mechanics. — 2018. — Vol. 27, № 7. — P. 1000—1019.