

Научная статья
УДК 625.71
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>
EDN: JBGKНJ



ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАТОРФОВАННЫХ ГРУНТОВ ПРИ УПЛОТНЕНИИ И ПРОМОРАЖИВАНИИ

И.С. Кузнецов ✉, В.В. Сиротюк, П.В. Орлов, В.Н. Кузнецова
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
ilyxa_kyznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Известно, что обводненные заторфованные грунты преобладают на Севере России и на территории её Арктической зоны. Такие грунты обладают малой несущей способностью, что снижает возможность их использования при строительстве автозимников. Уплотнение (обжимка) заторфованных грунтов изменяет их теплофизические и физико-механические свойства, изменяя режимы промерзания и оттаивания слабых оснований, а также несущую способность сухопутных автозимников на заболоченных территориях. В статье отражены результаты экспериментальных исследований изменения теплофизических и физико-механических показателей заторфованного грунта при разной степени его уплотнения.

Методы и материалы. Для исследований применяли маловлажный грунт с высоким содержанием органического вещества (торфа) более 50%. Его уплотняли нагрузками, величина которых характерна при операциях по уплотнению (обжимке) слабых заторфованных оснований на автозимниках (0,01, 0,03 и 0,06 МПа), и замораживали в камере до температуры минус 15 °С. Контроль температуры осуществляли на различной глубине образца через заданные промежутки времени. Для этого скомпоновали прибор, основными элементами которого являются термодатчики марки DS18B20 и микроконтроллер ArduinoNano. Теплопроводность талого и мёрзлого грунта определяли с помощью зондового прибора МИТ-1. Для определения прочности (твёрдости) образцов использовали динамический плотномер Д-51 и универсальный пенетрометр ПУС-3М.

Результаты. Уточнены свойства исследуемого органического грунта. Определена теплоёмкость этого грунта в зависимости от его влажности, температуры и плотности. Оценено влияние степени уплотнения грунта на кинетику его промораживания. Представлены результаты исследования зависимости условной прочности (твёрдости) грунта при разной температуре и плотности, а также результаты интерпретации результатов динамического зондирования в модуль упругости для исследуемого заторфованного грунта.

Заключение. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта увеличивает его теплопроводность и скорость промерзания верхнего слоя болота, что способствует ускорению ввода автозимника в эксплуатацию. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта значительно увеличивает его прочность при замораживании, что предопределяет увеличение несущей способности автозимников на болотах. Наиболее перспективно использование для оперативного контроля плотности и прочности промороженной торфяной плиты на автозимниках методов динамического зондирования пенетрометрами различной конструкции. Получены результаты определения условного показателя прочности (твёрдости) торфяного грунта с помощью зондирования динамическим плотномером и универсальным пенетрометром.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автозимник, заторфованный грунт, уплотнение, промораживание, теплофизические и механические свойства

Статья поступила в редакцию 05.10.2024; одобрена после рецензирования 29.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Орлов П.В., Кузнецова В.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Орлов П.В., Кузнецова В.Н. Изменение теплофизических и механических свойств заторфованных грунтов при уплотнении и промораживании // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 972-983. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

EDN: JBGKHJ

CHANGES IN THE THERMOPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BLOCKED SOILS DURING COMPACTION AND THE PROMOTION

Ilya S. Kuznetsov ✉, Viktor V. Sirotiuk, Pavel V. Orlov, Viktoria N. Kuznetsova
The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk

✉ corresponding author
ilyxa_kuznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. It is known that flooded, blocked soils prevail in the North of Russia and in the territory of its Arctic zone. Such soils have a low bearing capacity, which reduces the possibility of their use in the construction of winter roads. Compaction (crimping) of blocked soils changes their thermophysical and physico-mechanical properties by changing the modes of freezing and thawing of weak bases, as well as the bearing capacity of overland winter trucks in wetlands. The article reflects the results of experimental studies of changes in the thermophysical and physico-mechanical parameters of the blocked soil at different degrees of its compaction.

Methods and materials. Low-moisture soil with a high content of organic matter (peat) of more than 50% was used for research. It was compacted with loads, the magnitude of which is typical for sealing (crimping) operations of weak blocked bases on autosomes (0.01, 0.03 and 0.06 MPa), and frozen in a chamber to a temperature of -15 °C. Temperature control was carried out at different depths at predetermined intervals. To do this, we put together a device, the main elements of which are DS18B20 brand thermal sensors and an Arduino Nano microcontroller. The thermal conductivity of thawed and frozen soil was determined using the MIT-1 probe device. A dynamic density meter D-51 was used to determine the strength (hardness) of the samples and the universal penetrometer PUS-3M.

Results. The properties of the studied organic soil have been clarified. The heat capacity of this soil is determined depending on its humidity, temperature and density. The influence of the degree of soil compaction on the kinetics of its freezing is estimated. The results of the study of the dependence of the conditional strength (hardness) of the soil at different temperatures and densities, as well as the results of the interpretation of the results of dynamic zonation and the modulus of elasticity for the studied blocked soil are presented.

Conclusion. Compaction (crimping) of the blocked soil increases its thermal conductivity and the rate of freezing of the upper layer of the swamp, which helps to accelerate the commissioning of the winter truck. Compaction (crimping) of the blocked soil significantly increases its strength during freezing, which determines an increase in the bearing capacity of autozomers in swamps. The most promising use for operational control of the density and strength of a frozen peat slab on autozomers is dynamic sensing methods with penetrometers of various designs. The results of determining the conditional strength index (hardness) of peat soil using probing with a dynamic density meter and a universal penetrometer are obtained.

KEYWORDS: autozymer, blocked soil, sealing, freezing, thermophysical and mechanical properties

The article was submitted: 05.10.2024 approved after reviewing: 29.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Orlov P.V., Kuznetsova V.N. Changes in the thermophysical and mechanical properties of blocked soils during compaction and the promotion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 972-983. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

© Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Orlov P.V., Kuznetsova V.N., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Освоение северных территорий является стратегической задачей для России. Площадь российской Арктики составляет более 5 млн км², протяжённость её морской границы около 20 тыс. км. Для северных территорий нужно обеспечить транзит всех ресурсов, завоз материалов и оборудования, необходимых для создания инфраструктуры, обустройства месторождений полезных ископаемых и населённых пунктов. Строить капитальные дороги в таких сложных климатических и грунтово-гидрологических условиях очень дорого и не всегда целесообразно. Поэтому основной грузопоток в этих регионах идёт по временным дорогам – автозимникам. Протяжённость автозимников в России составляет около 30 тыс. км, по ним перевозятся сотни тысяч тонн грузов. Основной недостаток временных дорог – ограниченные сроки службы (3-4 месяца) и грузоподъёмности. Следовательно, исследования, направленные на улучшение транспортно-эксплуатационных показателей автозимников, являются актуальными^{1,2} [1, 2, 3, 4].

Известно, что обводнённые заторфованные грунты преобладают на Севере России. Они обладают малой несущей способностью, что осложняет их использование при строительстве автозимников. Существует два основных способа технической мелиорации заторфованных грунтов: осушение и уплотнение.

Осушение является трудоёмким процессом на рассматриваемых территориях, поэтому для строительства автозимников его используют редко. Уплотнение (обжимка) заторфованных грунтов изменяет их теплофизические и физико-механические свойства, что, в свою очередь, меняет режимы промерзания и оттаивания слабых оснований, а также несущую способность автозимников на заболоченных территориях. Этому вопросу посвящены многочисленные исследования³ [5, 6, 7, 8].

Для уплотнения заторфованных грунтов рекомендуется использовать технику повышенной проходимости с малым удельным давлением на поверхность. Кроме того, возможно

использование специального навесного оборудования, позволяющего уплотнять грунт по всей ширине автозимника [9, 11, 12, 13].

Цель проведённых исследований – дальнейшее развитие знаний и закономерностей по вопросу технической мелиорации заторфованных грунтов методом уплотнения (обжатия). В статье отражены результаты экспериментальных исследований изменения теплофизических и физико-механических показателей заторфованного грунта при разной влажности и степени его уплотнения, при разной температуре.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследований использован грунт, доставленный из карьера у п.г.т. Тевриз в Омской области. Испытания показали, что этот грунт имеет естественную влажность 354%, содержание органических веществ – 89,6%, зольность – 27,3%, показатель pH – 7,0.

В соответствии с ГОСТ 25100–2020 образец относится к органическим грунтам с высоким содержанием органического вещества (торфа) более 50%.

Твёрдое вещество этого торфа состоит из не полностью разложившихся растительных остатков (растительного волокна, продуктов разложения растительных остатков), тёмного бесструктурного вещества (гумуса) и неорганических примесей. Волокнистая часть образует своеобразный структурный каркас, ячейки которого заполнены аморфной массой из продуктов разложения и неорганических примесей.

В соответствии с работой [9] при зольности 20–40% торф следует относить к высокозольным (минерализованным), маловлажным (300–600%), с нейтральной кислотностью.

Для определения динамики изменения теплофизических свойств талого и мёрзлого грунта применяли измеритель теплопроводности материалов «МИТ-1» (рисунок 1), предназначенный для оперативного определения теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов зондовым методом по ГОСТ 30256–94 и ГОСТ Р 71038–2023 (п.6).

¹ Копылов С.В. Особенности нормативно-правовой документации по устройству и эксплуатации автозимников // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера: сборник материалов III Всероссийского форума, Якутск, 29 марта 2022 года. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. С. 273–277.

² Лотышева А.А., Конорева А.А. К вопросу о строительстве и эксплуатации автозимников // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск, 22–23 апреля 2021 года. Омск: СИБАДИ, 2021. С. 699–703.

³ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02-85). Союздорнии Минтрансстроя СССР. М.: Стройиздат. 1989. 192 с.



Рисунок 1 – Общий вид прибора МИТ-1
Источник: Интерприбор.

Figure 1 – General view of the MIT-1 device
Source: Interpribor.

Принцип действия этого прибора основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определённое время при его нагреве постоянной мощностью.

Перед началом эксперимента в образце грунта высверливали вертикальное отверстие диаметром 6 мм, в которое помещали зонд испытательного прибора. Далее производили включение прибора и выбор предполагаемой теплопроводности материала. Дальнейшие действия по определению теплопроводности прибор выполняет в автоматическом режиме ожидания стабилизации температуры. По окончании измерений на экране прибора высвечивается измеренное значение теплопроводности грунта. Для повышения достоверности полученных результатов измерения повторяли не менее 3 раз, просверливая новое отверстие на расстоянии не менее 30 мм от первого и выжидая 30 мин для стабилизации температуры измерительного зонда. При измерении показателей мёрзлого грунта образец с погруженным зондом выдерживали в морозильной камере не менее 6 ч для формирования однородного температурного поля.

Измерения проводили на образцах грунта разной плотности в талом состоянии и в процессе их промораживания.

Исследования влияния плотности грунта на скорость его промораживания при разных температурах выполняли на образцах размером 400x400x100 мм. Внутреннюю поверхность форм утепляли и укрывали пленкой для обеспечения верхнего промораживания без потери влаги (рисунок 2).

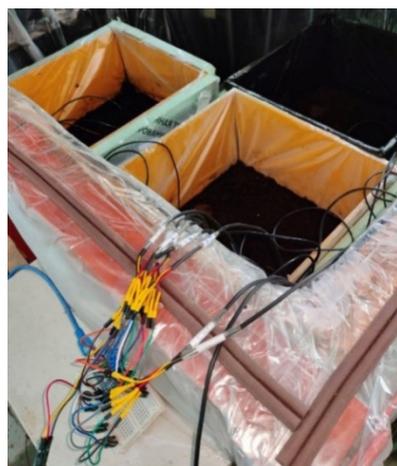


Рисунок 2 – Образцы грунта с подключенными датчиками температуры
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Soil samples with connected temperature sensors
Source: compiled by the authors.

Грунт уплотняли плунжером с 3-кратным приложением нагрузки и выдерживанием её в течение 1 мин. Величину нагрузки назначали исходя из возможностей машин, применяемых при операциях по уплотнению (обжимке) слабых заторфованных оснований на автосимниках (0,01, 0,03 и 0,06 МПа) [10].

Для измерения температур в каждую форму вставляли по три термодатчика. Верхний датчик № 1 располагали на глубине 2 см от поверхности грунта, второй датчик – на глубине 5 см, третий – на глубине 8 см.

Устанавливали по три формы в климатическую камеру, подключали контроллеры и замораживали при температуре до минус 15 °С круглосуточно до стабилизации температуры по всей глубине образца. Фиксировали изменение температуры по глубине каждый час промораживания.

Для контроля температуры образцов скомпоновали специальный прибор, основными элементами которого являются термодатчики марки DS18B20 и микроконтроллер ArduinoNano. Для работы микроконтроллера разработана программа управления с выводом результатов измерения на монитор компьютера.

В процессе промораживания контролировали условный показатель прочности (твёрдости) мёрзлого грунта методом динамического зондирования при помощи динамического плотнометра RGK Д-51А (рисунок 3). Этот показатель определяли по количеству ударов гири массой 2500 г, сбрасываемый по стержню высоты 400 мм, до погружения этого конического стержня на глубину 100 мм.

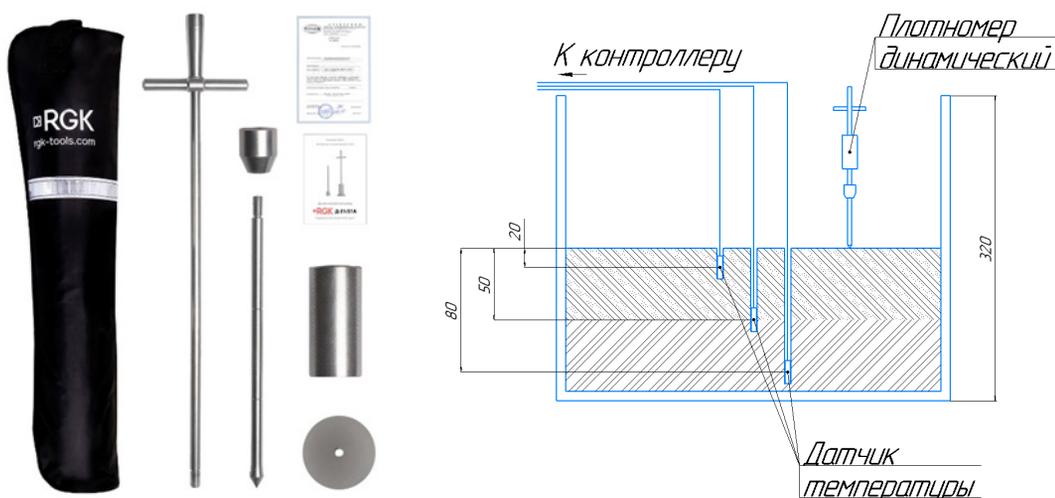


Рисунок 3 – Динамический плотномер RGK Д-51А и схема проведения эксперимента
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dynamic density meter RGK D-51A and the scheme of the experiment
Source: compiled by the authors.

Динамическое зондирование – процесс погружения зонда в грунт под действием ударной нагрузки с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда.

Этот метод испытаний относится к классу динамических испытаний грунтов. Он был предложен в начале 20-х годов прошлого столетия и широко применяется в зарубежной практике исследований свойств грунтов [14]. За рубежом разработаны многочисленные нормативы по применению этого метода испытаний грунтов^{4,5,6,7} [15, 16].

В нашей стране метод динамического и статического зондирования грунтов также нашёл широкое распространение⁸ [17, 18] в промышленном и гражданском строительстве. Методы зондирования нормируются в ГОСТРИСО 22476-2–2017 Испытания полевые. Часть 2 Динамическое зондирование

(DP), ГОСТ 19912–2012 Динамическое зондирование грунтов.

В транспортном строительстве этот метод испытаний пока не нормирован. Он применяется для оперативного контроля плотности грунтов в земляном полотне, но требует подтверждения методами стандартных испытаний. Только в Руководстве по эксплуатации гражданских аэродромов РФ (РЭГА РФ-94) рекомендуется применять твёрдомер НИАС (аналог статического зонда) для определения показаний прочности (несущей способности) уплотнённого снежного покрытия. Этот документ также рекомендует определять показатель прочности грунта с помощью ударника У-1 (аналог динамического зонда).

Кроме динамического пенетрометра для определения прочностных и деформационных характеристик заторфованного грунта использовался универсальный пенетрометр ПУС-3М (рисунок 4).

⁴ ASTM D 4633-86* Standard test method for stress wave energy measurements for dynamic penetrometer testing systems (Стандартный метод испытания изменением энергии волн напряжений для испытательных систем с динамическим пенетрометром).

⁵ EN 1997-2, Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing (Еврокод 7 Геотехническое проектирование. Часть 2. Исследование грунтов и проведение испытаний).

⁶ EN ISO 22476-3, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 3: Standard penetration test (ISO 22476-3:2005) [Геотехнические исследования и испытания. Полевые испытания. Часть 3. Стандартное испытание проникающей способности (ISO 22476-3:2005)]

⁷ Пособие к ст. нормам Респ. Беларусь. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов: П2-2000 к СНБ 5.01.01-99: утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 25.06.2000: введ. 01.07.2001. Минск: Минстрой архитектуры, 2001. 22 с.

⁸ Мухаметзянов Ф.З. Разработка метода и средств использования данных динамического зондирования при проектировании усиления фундаментов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Ф.З. Мухаметзянов. Уфа, 2005. 21 с.



Рисунок 4 – Универсальный пенетрометр ПУС-3М, общий вид
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Universal penetrometer PUS-3M, general view
Source: compiled by the authors.

Прибор позволяет оперативно определить: угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль упругости и иные параметры. Этот прибор был использован для исследований немёрзлых заторфованных грунтов, подвер-

гнутых трехкратному обжиму нагрузками 0,01, 0,03 и 0,06 МПа с периодичностью одна минута.

Испытания прибором ПУС-3М выполняли в следующем порядке:

- выбирали режим работы и диаметр рабочего наконечника, с которым проводятся измерения;
- перед началом каждого измерения прибор удерживали на весу, нажимали кнопку «Старт», затем рабочий наконечник плавно вдавливали в грунт за 10–12 сек на глубину 75 мм;
- после стабилизации показателей нажимали кнопку «Ввод».

После проведения пенетрации на индикаторе отображаются значения E_w – сопротивление пенетрации и E_g – модуль упругости.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона замороженного торфяного грунта определяли по ГОСТ 24452–2023 на образцах призмах размером 100x100x400 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения теплопроводности грунта при разной плотности и температуре представлены на рисунке 5.

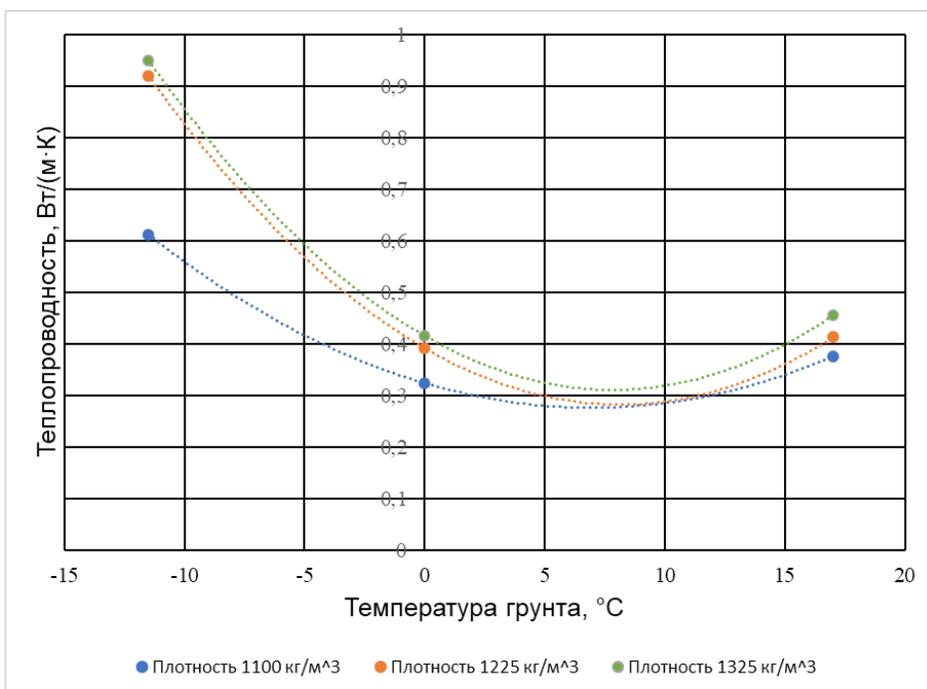


Рисунок 5 – Изменение теплопроводности грунта от его плотности и температуры
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Changes in the thermal conductivity of the soil from its density and temperature
Source: compiled by the authors.

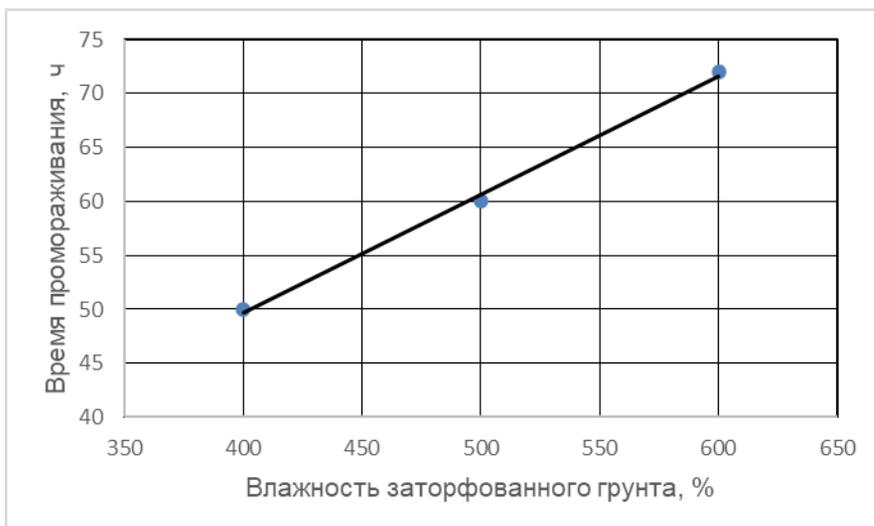


Рисунок 6 – Влияние влажности заторфованного грунта на скорость его промерзания
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The effect of the humidity of the blocked soil on the rate of its freezing
 Source: compiled by the authors.

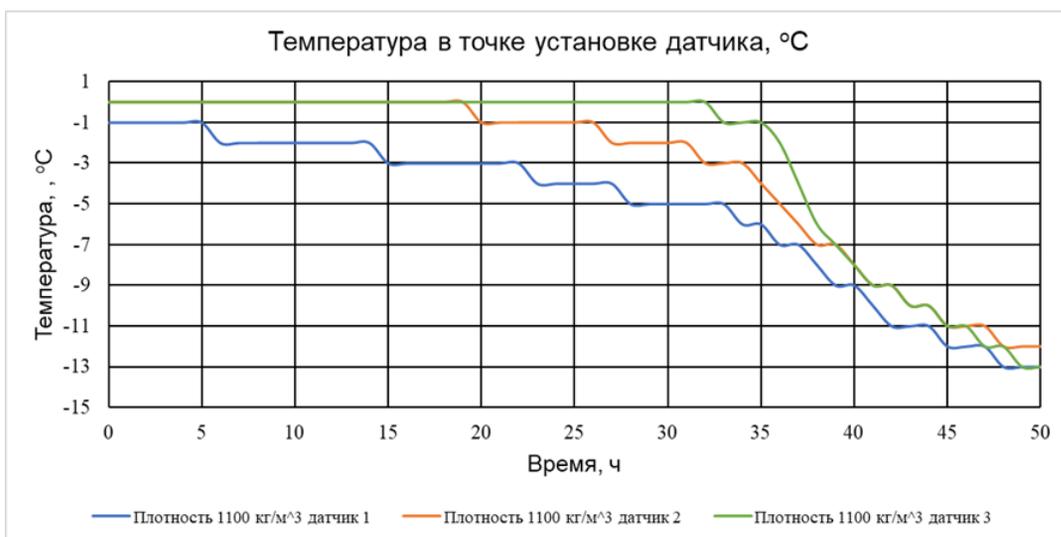


Рисунок 7 – Изменение температуры по глубине образца от времени промораживания для грунта с минимальной плотностью
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Temperature change in the depth of the sample from the freezing time for soil with a minimum density
 Source: compiled by the authors.

Удельная теплоёмкость для любого вещества есть величина переменная, то есть она зависит от температуры и агрегатного состояния вещества.

Минимальная плотность – 1100 кг/м³ и минимальная теплопроводность грунта (конгломерата из твёрдой фазы, воды и воздуха) получены при уплотнении образцов нагрузкой 0,01 МПа; плотность 1225 кг/м³ получена при нагрузке уплотнения 0,03 МПа; плотность

1325 кг/м³ и максимальная теплопроводность получены при нагрузке уплотнения 0,06 МПа. Этот результат вполне логичен, т.к. повышение плотности происходит за счёт частичного отжатия воздушной фазы из грунта с понижением его пористости. В рассматриваемом диапазоне положительных температур теплопроводность воздуха составляет всего 0,0228–0,255 Вт/ (м град), в то время как воды – в 24 раза больше: 0,569–0,588 Вт/ (м град).

При переходе в зону отрицательных температур теплопроводность воздуха и твёрдой фазы изменяются мало, а при переходе воды в лёд её теплопроводность увеличивается в 4 раза – до 2,34 Вт/ (м град). На рисунке 6 представлен график влияния влажности заторфованного грунта одинаковой плотности на скорость промерзания слоя 20 см при минус 15 °С.

Наблюдается прямая пропорциональная зависимость: с увеличением влажности в 1,5 раза скорость промерзания возрастает в 1,44 раза.

На рисунках 7 и 8 представлены результаты экспериментов по определению времени промерзания заторфованного грунта при постоянной влажности (400%), но разной плотности (1100 кг/м³ и 1325 кг/м³, полученной в результате уплотнения нагрузками 0,01 МПа и 0,06 МПа).

Как следует из результатов эксперимента, на начальном этапе (до 30 ч) происходит процесс охлаждения и кристаллизации воды, содержащейся в грунте. В связи с этим температура практически не изменяется, что связано с теплотой фазового перехода воды. Для грунта с минимальной плотностью (1100 кг/м³) основным фактором, определяющим скорость промораживания на начальном этапе, является наличие значительного объёма воздушных каверн, обеспечивающих снижение градиента температуры от поверхности в глубину образца. Для грунта с максимальной плотностью (1325 кг/м³) на начальном этапе основной вклад вносит образовавшийся на поверхности лёд. После 40 ч скорость промораживания выравнивается и в дальнейшем промораживание идёт по типу единого грунтово-ледяного конгломерата.

Таким образом, увеличение плотности образцов на 12% приводит к ускорению их промерзания на 15%. Сопоставляя графики на рисунках 6, 7 и 8 можно констатировать, что увеличение влажности на эту же величину (12%) увеличивает скорость промерзания только на 10%. Следовательно, увеличение плотности грунта за счёт отжатия воздушной фазы даёт больший эффект, нежели его осушение (в рассматриваемых границах).

Данные, полученные нами при экспериментальных исследованиях, хорошо согласуются с результатами ранее опубликованных исследований по этому вопросу [6, 8, 9, 19].

Графики на рисунке 9 отражают результаты исследования изменения условной прочности (количества ударов на погружение стержня ударника на 10 см) образцов заторфованного грунта по мере его промораживания.

Увеличение плотности образцов на 12% приводит к кратному увеличению их прочности после замораживания.

Столь значительное увеличение прочности водонасыщенного замороженного заторфованного грунта объясняется превращением воды в лёд. Прочность каркаса изо льда находится в обратной зависимости от температуры. Например, в диапазоне от 0 °С до -40 °С прочность на сжатие речного льда увеличивается примерно в 4 раза, а на растяжение – лишь в 1,5 раза.

Торфяные волокна, армирующие грунт, делают его в 2-3 раза прочнее по сравнению с чистым льдом. Но прочность увеличивается только в верхнем слое залежи до 40 см. В нижележащих слоях слабого основания повышается температура торфа и содержание незамёрзшей воды. И, как правило, наблюдается более высокая степень разложения торфа с уменьшением содержания армирующих волокон.

Для интерпретации результатов динамического зондирования получены десятки формул и графиков почти для всех разновидностей дисперсных грунтов, но для заторфованных грунтов в талом или мёрзлом состоянии мы не обнаружили публикаций по данному вопросу.

На рисунке 10 представлены результаты интерпретации результатов динамического зондирования, полученные нами с помощью корреляционной зависимости между количеством ударов для погружения зонда на 10 см и модулем упругости для исследуемого заторфованного грунта.

Испытания показали, что при замораживании заторфованного грунта величина модуля упругости может возрастать в сотни раз.

Главное преимущество применения методов зондирования в дорожном строительстве заключается в относительной простоте и оперативности получения информации по одному из механических показателей грунтов. Основным недостатком этих методов – необходимость интерпретации получаемых результатов со стандартными методами изучения механических свойств грунтов.

Выполнены обширные исследования [20] для выявления эмпирических зависимостей между индексом динамического проникновения конуса (DCPI, мм/удар) и, например, Калифорнийским числом несущей способности грунта (CBR). Корреляционная связь CBR с DCPI может быть записана в общем виде формулой

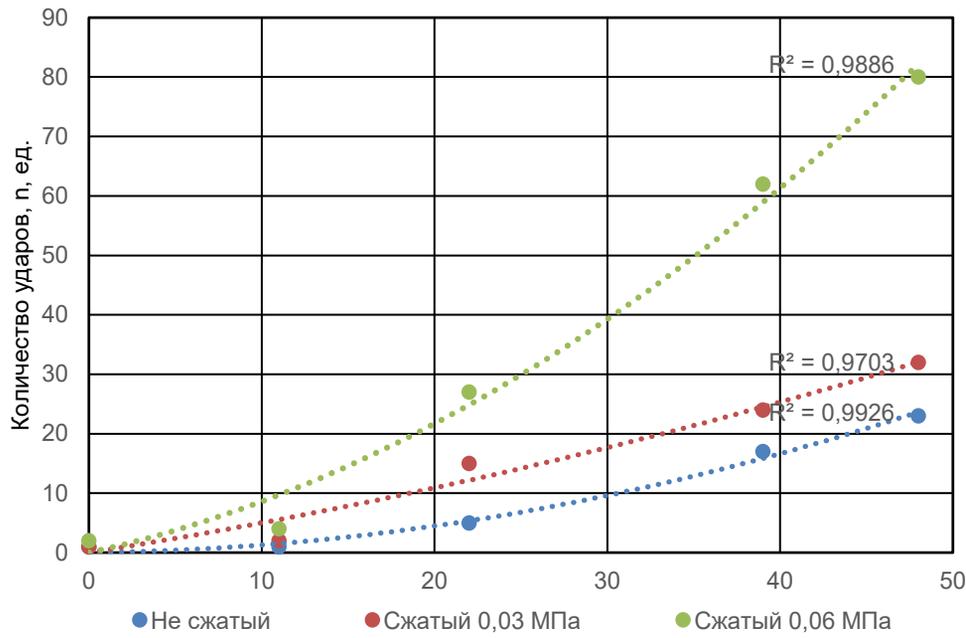


Рисунок 9 – Зависимость прочности (количества ударов, n) от времени промораживания образца
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Dependence of strength (number of impacts, n) on the freezing time of the sample
 Source: compiled by the authors.

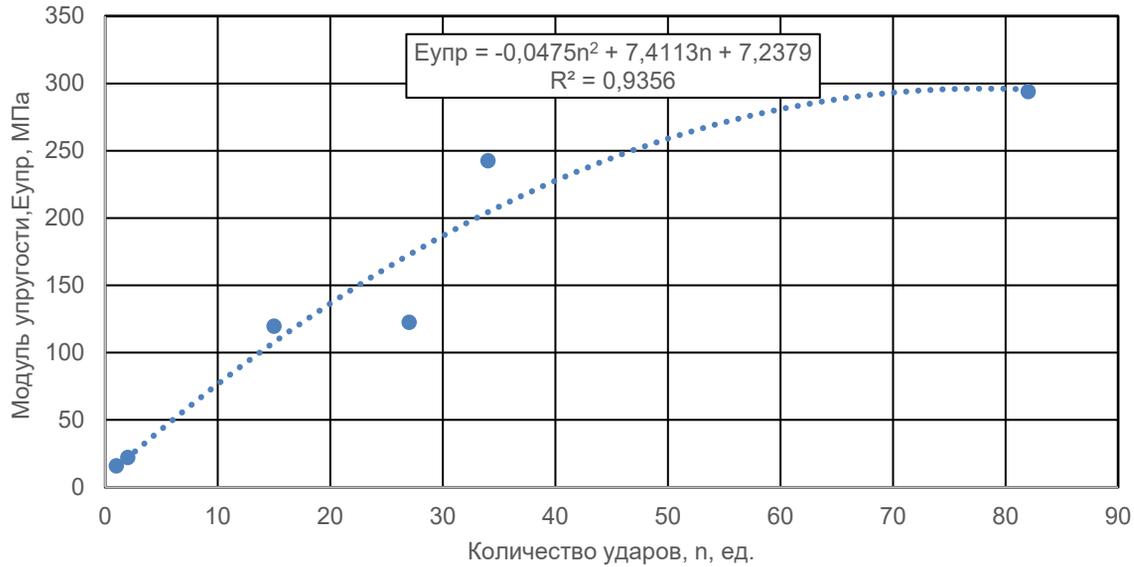


Рисунок 10 – Зависимость между количеством ударов при динамическом зондировании и модулем упругости
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The relationship between the number of impacts during dynamic sensing and the modulus of elasticity
 Source: compiled by the authors.

$$\text{Log (CBR)} = f - g \text{Log (DCPI)},$$

где DCPI – индекс проникновения конуса, мм/удар; f и g – параметры уравнения регрессии, зависящие от вида и состояния тестируемого материала.

В данной статье показатель динамического зондирования мы назвали условным показателем прочности (твёрдости) мёрзлого грунта, в отличие от классических (стандартных) методов определения механических свойств материалов. Критический анализ т.н. стандартных методов показывает, что их также можно отнести к условным. Это подтверждается тем, что все методы определения механических свойств материалов всецело зависят от методик испытаний, а также от применяемого оборудования и приборов, физических параметров материалов, при их испытаниях и т.п. А поэтому все основные методы определения прочности и деформативности материалов детально прописаны в регулярно меняющихся нормативах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать некоторые выводы и заключение:

1. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта увеличивает его теплопроводность и скорость промерзания верхнего слоя болота на 15%, что способствует ускорению ввода автозимника в эксплуатацию.

2. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта значительно увеличивает его прочность при замораживании, что предопределяет увеличение несущей способности автозимников на болотах при их уплотнении.

3. До настоящего времени не развиты методы оперативного контроля плотности, прочности и прогнозирования несущей способности промороженной торфяной плиты на автозимниках. Наиболее перспективно использование для этой цели методов динамического зондирования пенетрометрами различной конструкции. Однако это сопряжено с объективной трудностью, связанной с интерпретацией получаемых результатов для достоверного получения стандартизированных механических показателей замороженных торфяных грунтов. Нами получены результаты определения условного показателя прочности (твёрдости) с помощью динамического зондирования промороженного торфяного грунта плотномером. Установлена эмпирическая зависимость между показателем динамического зондирования

и модулем упругости исследуемого заторфованного грунта.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дальнейшие исследования по определению закономерностей изменения теплофизических и механических показателей заторфованных грунтов и получения достоверных расчётных численных значений этих показателей будут выполняться при испытаниях на реальных опытных участках автозимников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов А.В., Фирсова С.Ю., Дорохина В.С. Повышение эффективности автомобильных перевозок в условиях Крайнего Севера Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021; 18(3): 286–305. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305>
2. Филиппова Н.А. Научные пути решения проблем организации и планирования перевозок грузов в районы Крайнего Севера и Арктические зоны России // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 2. С. 11–22. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>.
3. Боброва Т.В., Бедрин Е.А., Дубенков А.А. Прогнозирование эффективности дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // Вестник СибАДИ. 2011. № 22. С.11–16.
4. Куклина В.В., Осипов М.Е. Роль зимников в обеспечении транспортной доступности арктических и субарктических районов Республики Саха (Якутия) // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 2. С. 107–112.
5. Морозов В.С. Расчет однослойных зимних автомобильных дорог на прочность // Инновационная наука. 2015. №11. С. 84–88.
6. Морозов, В.С., Фомин Е.Г. Исследование реологических свойств мерзлого торфа // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2009. № 6. С. 72–80.
7. Морозов В.С. Расчет на прочность оснований зимних дорог на заболоченных грунтах // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2012. № 6. С. 58–65.
8. Иванов Г.Н. Изучение упругих свойств торфа при промерзании // Труды Инсторфа. 2021. № 23 (76). С. 11–17.
9. Мадьяров Т.М., Русмиленко А.К., Костырченко В.А. Технология строительства автозимников специального назначения для перевозки негабарита с применением комбинированной машины // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10 (82). С. 291 – 300.
10. Егоров А.Л., Мерданов М.Ш., Черняков Е.Н., Чернякова О.О. Комплект машин для строительства временных зимних дорог // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 97 – 101.
11. Шитый В.П., Шаруха А.В., Мерданов Ш.М., Сысоев Ю.Г. Обоснование целесообразности создания машин, совмещающих технологические опе-

рации при строительстве снежоледовых дорог // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 145

12. Мадьяров Т.М., Русмиленко А.К., Костырченко В.А. Компоновка комбинированной машины на базе автомобиля КамАЗ // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4 (88). С. 566 – 575.

13. Обухов А.Г., Шаруха А.В., Костырченко В.А. Прицепное вибрационное устройство для проминки болотистых оснований под строительство снежоледовых дорог // Вестник Курганской ГСХА. 2015. № 4 (16). С. 71–72.

14. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования: монография. М.: Изд-во ООО «Прондо». 2017. 476 с.

15. Matsumoto, T; Sakaguchi, H., Yoshida, H. & Kita, K: Significance of two-points train measurements in SPT. *Soils and Foundations*. JSSMFE. 1992. Vol. 32. № 2. pp. 67–82.

16. Самофеев Н.С., Ковалева Д.В. Оценка эффективности применения средств малой механизации при динамическом зондировании грунта в стесненных условиях // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Том 9, № 6 (2017). <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> (доступ свободный).

17. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Сопоставление механических свойств аргиллитов раннепермского возраста по результатам полевых и лабораторных испытаний // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 55–63.

18. Протодьяконова Н.А. Теплофизические свойства торфов и заторфованных песчаных грунтов / Н.А. Протодьяконова, А.В. Степанов, А.М. Тимофеев, О.Н. Кравцова, Н.И. Таппырова // Успехи современного естествознания. 2024. № 1. С. 52–57; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38207> (дата обращения: 12.10.2024).

19. Миляев А.С. Альтернативная методика расчета промерзания слоистых оснований сезонных зимних лесовозных дорог // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозав. гос. ун-т. Петрозаводск, 2010. Вып. 8. С. 83–87. DOI: 10.15393/j2.art.2010.1773. Текст: электронный. Режим доступа: Resources and Technology: научный журнал. 2010. Вып. 8. URL: <https://elibrary.petsu.ru/books/50450> (дата обращения: 12.11.2024).

20. Семёнова Т.В., Долгих Г.В., Полугородник Б.Н. Применение Калифорнийского числа несущей способности и динамического конуса пенетromетра для оценки качества уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2013. № 1(35). С. 59–66.

REFERENCES

1. Kulikov A.V., Firsova S.Y., Dorokhina V.S. Improving efficiency of car transportation in extreme north conditions in Russian Federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 286–305. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305>

2. Filippova N.A. [Scientific ways for solving problems of organizing and planning cargo transportation to the areas of the Far North and Arctic Zones of Russia]. *Intellekt. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]*. 2024; Vol. 2: 11–22. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>.

3. Bobrova T.V., Bedrin E.A., Dubenkov A.A. Forecasting the effectiveness of road structures on permafrost soils. *Vestnik SibADI*. 2011; 22: 11–16. (in Russ.)

4. Kuklina V.V., Osipov M.E. The role of winter roads in ensuring transport accessibility of the Arctic and subarctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia). *Society. Environment. Development (“TERRA HUMANA”)*. 2018; 2: 107–112. (in Russ.)

5. Morozov V.S. Calculation of single-layer winter highways for durability. *Innovative science*. 2015; 11: 84–88. (in Russ.)

6. Morozov V.S., Fomin E. G. Investigation of rheological properties of frozen peat. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2009; 6: 72–80. (in Russ.)

7. Morozov V.S. Strength Analysis of Winter Road Bases on the Boggy Grounds. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2012; 6: 58–65. (in Russ.)

8. Ivanov, G.N. The study of elastic properties of peat during freezing. *Proceedings of Instorf*. 2021; 23 (76): 11–17. (in Russ.)

9. Magyarov T.M., Rusmilenko A.K., Kostyrchenko V.A. Technology of construction of special-purpose winter trucks for the transportation of oversized cargo using a combined machine. *Engineering journal of Don*. 2021; 10 (82). (in Russ.)

10. Egorov, A.L., Mardanov M.Sh., Chernyakov E.N., Chernyakova O.O. A set of machines for the construction of temporary winter roads. *Modern problems of science and education*. 2013; 5. (in Russ.)

11. Shityi V.P., Sharukha A.V., Merdanov S.M., Sysoev Y.G. Substantiation of the expediency of creating machines combining technological operations in the construction of snow-covered roads. *Modern problems of science and education*. 2014; 3. (in Russ.)

12. Magyarov, T.M., Rusmilenko A.K., Kostyrchenko V.A. The layout of a combined vehicle based on a KamAZ car. *Engineering journal of Don*. 2022; 4 (88). (in Russ.)

13. Obukhov A.G., Sharukha A.V., Kostyrchenko V.A. Trailed vibrating device for washing marshy foundations for the construction of snow-covered roads. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2015; 4 (16): 71–72. (in Russ.)

14. Boldyrev G.G. Guidelines for the interpretation of test data by static and dynamic sensing methods for geotechnical design. Publishing house, Pron-do LLC, Moscow. 2017: 476. (in Russ.)

15. Matsumoto, T; Sakaguchi, H., Yoshida, H. & Kita, K: Significance of two-point strain measurements in SPT. *Soils and Foundations*. JSSMFE. 1999; Vol. 32, № 2: 67–82. EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design/ -Part 1: General rules.

16. Samofeev N.S., Kovaleva D.V. Evaluation of the effectiveness of the use of small-scale mechanization tools for dynamic soil sounding in confined. *Nauko-*

vedenie. 2017; Volume 9, No. 6. <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> (free access).

17. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Comparison of the mechanical properties of mudstones of early Permian age according to the results of field and laboratory tests. *Vestnik MGSU*. 2013; 2: 55–63. (in Russ.)

18. Protodyakonova N.A., Stepanov A.V., Timofeev A.M., Kravtsova O.N., Tappurova N.I. Thermophysical properties of peat and peaty sand soils. *Advances in current natural sciences*. 2024;1: 52–57. (in Russ.) URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38207> (accessed: 12.10.2024).

19. Milyaev A.S. An alternative method for calculating the freezing of layered foundations of seasonal winter forest roads. *Resources and Technology*. 2010; 8: 83–87. (in Russ.) DOI: 10.15393/j2.art.2010.1773. (accessed: 12.11.2024).

20. Semenova T.V., Dolgih G.V., Polugorodnik B.N. Application of the California number of bearing capacity and the dynamic cone of the penetrometer to assess the quality of soil compaction. *Vestnik SibADI*. 2013; 1(35): 59–66. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Выполнение экспериментальных исследований. Написание статьи (35%).

Сиротюк В.В. Формулирование проблемы, направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Написание статьи. Формулировка результатов и выводов (30%).

Орлов П.В. Руководство исследованиями. Материальное обеспечение исследований (20%).

Кузнецова В.Н. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования. Редактирование статьи (15%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Review and analysis of publications on the stated topic. Performing experimental studies. Writing an article (35%).

Sirotyuk V.V. Formulation of the problem, directions and methods of research. Setting research objectives. Writing an article. Formulation of results and conclusions (30%).

Orlov P.V. Research management. Financial support for research (20%).

Kuznetsova V. N. Management of the development process of themes. The choice of methodology and research methods. Editing an article (15%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государ-

ственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,
SPIN-код: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Сиротюк Виктор Владимирович – главный научный сотрудник, д-р техн. наук проф., Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-код: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

Орлов Павел Викторович – начальник Научно-исследовательского отдела, канд. техн. наук Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>,

SPIN-код: 2413-6194.

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Ilya S. – Senior Lecturer of the Department “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-code: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Sirotyuk Viktor V. – Chief Scientific Officer, Dr. of Sci. (Eng), Professor, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-code: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

Orlov Pavel V. – Head of the Research Department, – Cand. of Sci. (Eng), Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>,

SPIN-code: 2413-6194.

Kuznetsova Victoria N. – Dr. of Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-code: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru