

ОЦЕНКА УПЛОТНЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВОГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛЕСНОЙ ДОРОГИ

**В.К. Катаров, Н.В. Алешина, В.С. Сюнев,
Е.И. Ратькова, В.И. Марков**

Петрозаводский государственный университет, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

vkatarov@petrsu.ru

Рассмотрена задача прогнозирования уплотненного состояния почвогрунта при строительстве лесной дороги. Приведены и обоснованы положения о формировании механической системы контактирующих частиц уплотняемого почвогрунта. Разработана модель уплотнения слоя рыхлого почвогрунта в системе «уплотняющее устройство — уплотняемый материал». Использован новый в данной области прикладных исследований компартментальный подход, в рамках которого исследуемая система подразделяется на взаимосвязанные отсеки, называемые компартментами, содержание определенной субстанции в каждом из которых представляет собой отдельную переменную системы. Проанализированы различные технологические ситуации — с минимально и максимально допустимыми вылетами стрелы экскаватора. Выполнено моделирование влияния пористости на толщину слоя почвогрунта при его уплотнении, более плотной упаковки частиц и появления остаточных (необратимых) деформаций. Разработана методика определения зависимости, связывающей степень уплотнения почвогрунта с изменением его пористости и деформаций. Обоснована сложность теоретического исследования уплотняемого почвогрунта. Практическая значимость разработанной модели уплотнения слоя почвогрунта и методики оценки его деформаций подтверждена при успешной реализации на стадиях проектирования и мониторинга строительства опытного участка лесной дороги, расположенного в Республике Карелия, на базе Петрозаводского государственного университета.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, регион, потенциал, эффективность, переработка

Ссылка для цитирования: Катаров В.К., Алешина Н.В., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Марков В.И. Оценка уплотненного состояния почвогрунтов при строительстве лесной дороги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 6. С. 106–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-106-117

Актуальность проблемы развития сети лесных дорог и совершенствования технологических решений их строительства определена на основании «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года» (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312-р). Стратегией оговорено, что леса России относятся к важнейшим возобновляемым природным ресурсам и выполняют важнейшие средообразующие и средозащитные функции. Их доля в мировых запасах древесной биомассы составляет более 25 %. Однако потенциал лесного комплекса используется не в полной мере. Ключевое значение для интенсификации использования и воспроизводства лесов имеет лесная инфраструктура, прежде всего плотность сети лесных дорог.

В Стратегии фиксируется, что годовая потребность в новом строительстве лесных дорог составляет в целом по Российской Федерации свыше 2,1 тыс. км автомобильных дорог постоянного действия и свыше 9,3 тыс. км автомобильных дорог сезонного действия. В то же время плановое увеличение протяженности автомобильных дорог с твердым покрытием на землях лесного фонда, по данным лесных планов субъектов Российской Федерации на 2018–2027 гг., за 10 лет составит всего 5 тыс. км, а рост общей плотности лесных

дорог — 0,1 км/1000 га [1]. Для сравнения, ежегодные объемы строительства лесных дорог в Финляндии изменяются в пределах от 0,85 до 1,95 тыс. км при наличии уже довольно развитой сети дорог с плотностью 9...14 км/1000 га [2, 3]. Это еще раз подчеркивает необходимость поиска эффективных ресурсосберегающих решений для интенсификации развития лесотранспортной инфраструктуры.

Цель работы

Цель работы — создание модели уплотнения слоя почвогрунта в системе «уплотняющее устройство — уплотняемый материал», разработка методики определения зависимости степени уплотнения почвогрунта от изменения его пористости и деформаций.

Материалы и методы

Анализ литературы показал, что в настоящее время обоснована экономическая целесообразность использования местных ресурсов при строительстве лесных дорог с учетом почвенно-климатических условий конкретного региона [4–6], выполнен достаточно большой объем исследований, относящихся к планированию грузопотоков в лесопромышленном комплексе [5, 7] и определению оптимальных маршрутов [8] с учетом новых технологий [9] и зарубежного опыта [10–12].

Однако почвенно-климатические различия регионов, допуская возможность использования известных общих принципов построения новых методик проектирования лесных дорог и технологий их строительства, могут создавать условия, при которых получение максимального технико-экономического эффекта от использования местных материалов будут необходимы уточнения свойств почвогрунтов, сезонных и межсезонных особенностей, характеристик имеющегося парка лесозаготовительной техники и других факторов [13, 14]. По этой причине необходимо решение некоторых задач, одна из которых связана с прочностью материалов почвогрунтов при воздействиях, появляющихся как при строительстве лесных дорог, так и при их дальнейшей эксплуатации [7, 14]. Следует отметить, что с учетом относительно небольшого срока службы лесных дорог, ограниченного объемом вывозимой древесины, заготовленной на определенной площади, при их возведении допускается использование почвогрунтов в качестве местных дорожно-строительных материалов.

В дополнение к известным результатам, относящимся к обоснованию новых технологических решений в области строительства лесных дорог и функционированию материалов дорожных конструкций, представляется целесообразным использование научных данных об эволюционной природе деструкции твердых тел и сред [13]. Термин «деструкция» объединяет понятия пластической деформации и разрушения в единый процесс эволюции материала при воздействиях на него, в ходе которого образуется иерархия блоков. При этом процесс деструкции материалов и сред распространяется на частицы всех реально существующих размеров. При строительстве лесной дороги деструкция и разрушение материала могут возникать при попытке его уплотнения выше некоторого предела. Таким образом, важно знать предел рационального уплотнения местных почвогрунтов, которые используются для строительства лесных дорог.

На основании проведенного публикационного анализа сформулирована рабочая гипотеза: при строительстве лесной дороги необходимым является установление предела рационального (или максимального) для данного почвогрунта уплотнения, что позволит избежать как деструкции уплотняемого материала и его разрушения, так и непроизводительных затрат времени, труда и технических ресурсов на его уплотнение после деструкции.

На рис. 1 представлены признаки деструкции материала (на примере песчаного почвогрунта), использованного при строительстве лесной дороги в условиях Республики Карелия [9] (масштабная

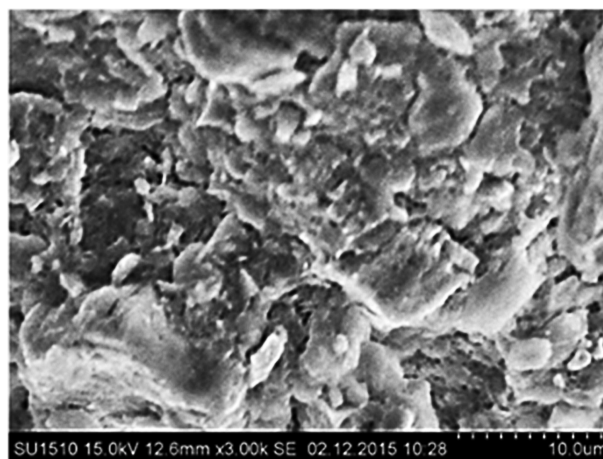


Рис. 1. Микроструктура материала (песчаный почвогрунт)
Fig. 1. Microstructure of the material (sandy soil and subsoil)

линейка 10 мкм, увеличение 3000 раз, электронный микроскоп SU 1510); образец отобран и подготовлен в соответствии с действующими утвержденными нормами и требованиями.

Деструкция и разрушение возникают в том случае, если нагрузка на конструкцию лесной дороги от проходящего автотранспорта превышает несущую способность применяемого дорожно-строительного материала. Осредненное значение несущей способности почвогрунта является линейной функцией его модуля деформации [15], что означает рост несущей способности почвогрунта с увеличением его модуля деформации, достижимый посредством уплотнения почвогрунта. В связи с этим первоочередным представляется исследование процесса уплотнения почвогрунта при воздействии на него конструктивных элементов дорожно-строительных машин.

Уплотняемый почвогрунт как неоднородный материал

В свете общепринятых математических положений уплотнение почвогрунта следует рассматривать как процесс перехода к более плотной упаковке его частиц. С точки зрения механики уплотнение почвогрунта и его консолидация могут быть интерпретированы как модификация материала, заключающаяся в увеличении его прочности, модуля упругости и модуля деформации.

Проведенный анализ результатов электронной микроскопии свидетельствует о разрушении связей между частицами почвогрунта при его уплотнении, что приводит к проскальзыванию (сдвигам) частиц друг относительно друга и, как следствие, необратимому изменению структуры материала. Известно, что для слоев оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог связь между частицами почвогрунта осуществляется непосредственно в «пятнах» контактов (в точках



Рис. 2. Фрагмент лесного супесчаного образца
Fig. 2. Fragment of forest sandy loam sample

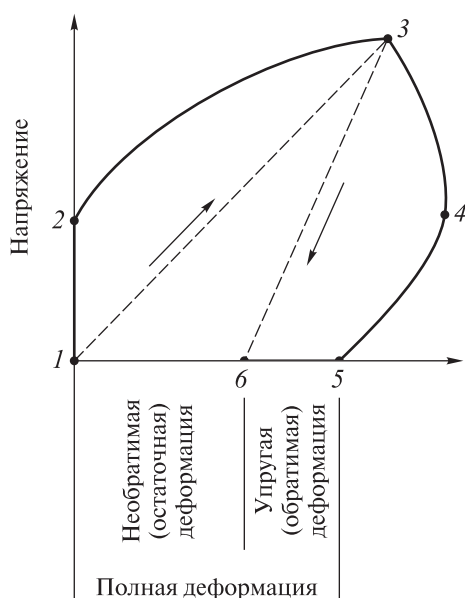


Рис. 3. Определение остаточных деформаций почвогрунта: 1 — момент соударения падающего груза-трамбовки с почвогрунтом; 2 — рост деформации через малый отрезок времени; 3 — максимум напряжения на поверхности контакта; 4 — максимум деформаций почвогрунтов; 5, 6 — восстановление упругих (обратимых) деформаций

Fig. 3. Determination of residual deformations of the soil: 1 — the moment of collision of the falling ramming load with the soil; 2 — growth of deformation after a short period of time; 3 — maximum voltage on the contact surface; 4 — maximum soil deformations; 5, 6 — restoration of elastic (reversible) deformations

соприкосновения движителя машины и покрытия дороги). По этой причине упругие деформации зависят от свойств материала неразрушенных контактирующих частиц [16].

В реальных почвогрунтах возникают как упругие, так и остаточные деформации. Остаточные деформации, доля которых по сравнению с упругими деформациями значительно больше [17], появляются и доминируют вследствие того, что процесс уплотнения почвогрунта сопровождается

разрушением связей между частицами, их перемещением и достижением более плотной упаковки, уменьшением пористости, вытеснением воды и воздуха из пор, консолидацией почвогрунта с образованием новых связей между его частицами за счет физико-химических взаимодействий.

Адекватность приведенных выше положений о формировании механической системы контактирующих частиц уплотняемого грунта подтверждается результатами проведенного анализа технических фотографий (рис. 2), полученных на электронном микроскопе SU-1510. На рис. 2 четко видна частица размером около 10 микрометров (0,01 миллиметра), через которую передается нагрузка от вышележащего микрослоя почвогрунта на нижележащий слой.

Остаточные деформации уплотняемого слоя почвогрунта

Для оценки уплотненного состояния почвогрунтов при строительстве лесных дорог рассмотрена система «уплотняющее устройство — уплотняемый почвогрунт». В качестве исходных данных при моделировании данной системы приняты числовые значения исследуемых физико-механических характеристик почвогрунта.

С точки зрения эксплуатации лесной дороги наибольший интерес представляют остаточные деформации, возникающие в дорожном полотне под действием проходящего транспорта при вывозке древесины. Эти деформации при одной и той же нагрузке тем больше, чем меньше модуль деформации грунта.

Модуль деформации представляет собой обобщенную характеристику почвогрунта, зависящую от упругих, пластических и касательных деформаций. Концептуальным аспектом разрабатываемого подхода к моделированию слоя уплотняемого почвогрунта является результат воздействия уплотняющего устройства на уплотняемый почвогрунт. С помощью применения понятия секущего модуля упругости, нелинейные зависимости для напряжений и деформаций [16], были заменены двумя линейными зависимостями, одна из которых соответствовала возрастанию давления на почвогрунт, а вторая — уменьшению давления (рис. 3).

На следующем этапе выполнялась оценка эффективности повторных нагружений почвогрунта при его уплотнении в рамках технологических возможностей строительства лесных дорог.

Очевидно, что при первичном нагружении почвогрунтов появляются как упругие, так и пластические деформации (см. рис. 3), а при разгрузке и повторном нагружении — преимущественно упругие деформации [18]. Следовательно, с каждым очередным циклом происходит снижение

эффективности уплотнения почвогрунта. В частности, подтверждением данного положения являются результаты экспериментальных исследований [19], согласно которым при увеличении частоты цикла нагружений уменьшается относительная деформация почвогрунта в пределах каждого цикла. Чем больше частота цикла нагружений, тем меньше время воздействия нагрузки на почвогрунт, поэтому поровая вода за непродолжительный промежуток времени не успевает вытесняться из пор почвогрунта. При этом в условиях малой водопроницаемости глинистый почвогрунт начинает работать как упругий материал с минимальными неупругими деформациями.

В рамках предлагаемого подхода к моделированию деформаций уплотняемого почвогрунта необходимо определить секущий модуль упругости почвогрунта при первичном, повторном и последующих нагружениях.

По причине сложности рассмотрения почвогрунта как объекта моделирования и расчета необходимо проведение предварительных расчетов, анализ результатов которых позволит обосновать выбор корректной модели. В данных расчетах могут быть приняты известные значения модуля деформации сжимаемого почвогрунта при первом и повторном нагружениях [20–25], которые согласуются с результатами наших исследований на опытном участке лесовозной ветки [21].

Моделирование изменений пористости и деформаций уплотняемого почвогрунта

В настоящее время актуальной задачей является разработка методики определения зависимости, связывающей способ и степень уплотнения с изменением комплекса физико-механических свойств (пористости и др.), и выявления значения реально достижимой в различных условиях плотности.

С физической точки зрения описание процесса уплотнения опирается на следующую систему понятий и допущений, необходимых для обоснования конкретных эмпирических зависимостей:

1) уплотняемый почвогрунт представляет собой пористый материал, поры равномерно распределены по объему грунта;

2) в процессе уплотнения имеют место обратимые (упругие) и необратимые (остаточные, пластические) деформации;

3) упругие деформации зависят от модуля упругости частиц, образующих скелет почвогрунта;

4) необратимые деформации зависят от пористости почвогрунта, а также от величины и продолжительности действия нагрузки; с увеличением продолжительности действия нагрузки

объем пор уменьшается, накапливаются остаточные деформации;

5) объем частиц, образующих скелет почвогрунта, остается постоянным в процессе уплотнения; с учетом допущения 4 уплотнение приводит к уменьшению доли пор в объеме почвогрунта (в пределе до нуля).

Математический смысл описываемой физической модели процесса уплотнения массива почвогрунта, начальный объем которого равен V_0 , заключается в следующем: в процессе уплотнения давление p на почвогрунт увеличивается, его объем V уменьшается и становится равным V_k . Таким образом, в любой момент времени

$$V_0 \leq V \leq V_k \text{ и } 0 \leq p \leq p_k. \quad (1)$$

Если продолжительность уплотнения разбить на одинаковые достаточно малые отрезки времени Δt , то каждому отрезку будет соответствовать изменение давления Δp .

Пусть в некоторый момент времени $t_i = t$ и, соответственно, при давлении $p_i = p$ объем частиц скелета почвогрунта равен V_a . Объем пор в тот же момент времени равен V_b . Тогда объем почвогрунта составляет

$$V = V_a + V_b. \quad (2)$$

Определение доли частиц скелета почвогрунта C_a и доли пор C_b в объеме почвогрунта V принимает вид

$$C_a = \frac{V_a}{V}; \quad (3)$$

$$C_b = \frac{V_b}{V}. \quad (4)$$

В момент времени $t_{i+1} = t + \Delta t$ при $p_{i+1} = p + \Delta p$ объем частиц скелета почвогрунта останется прежним, равным V_a . Однако их доля в объеме почвогрунта увеличится, поскольку объем пор уменьшится на величину ΔV_b :

$$V_b^* = V_b - \Delta V_b. \quad (5)$$

Соответственно, объем почвогрунта будет равен

$$V^* = V_a + V_b - \Delta V_b = V - \Delta V_b. \quad (6)$$

При прочих равных условиях долю (концентрацию) C_a^* частиц скелета в уплотняемом материале объемом V^* при давлении $p_{i+1} = p + \Delta p$ можно выразить следующим образом

$$C_a^* = C_a + \Delta C_a = \frac{V_a}{V^*} = \frac{V_a}{(V - \Delta V_b)}. \quad (7)$$

Анализ физического содержания задачи позволяет сформулировать гипотезу: величина ΔV_b пропорциональна Δp и объему пор в почвогрунте

V_b при давлении p . В связи с этим обоснованным является соотношение

$$\Delta V_b = \left(\frac{\Delta p}{\tau} \right) V_b, \quad (8)$$

где τ — не изменяющийся с течением времени параметр модели, который зависит от конструктивно-технологических характеристик уплотняющего устройства и физико-механических свойств уплотняемого почвогрунта. Параметр τ имеет ту же размерность, что и p , подлежит определению по результатам технологического эксперимента. Переходя к безразмерным переменным, следует ввести обозначение

$$\Delta \theta = \frac{\Delta p}{\tau}. \quad (9)$$

Подставив выражение (8) в формулу (7) с учетом условий (3), (4) и (9), получаем

$$C_a + \Delta C_a = \frac{C_a}{(1 - \Delta \theta C_b)}. \quad (10)$$

Предполагая, что ΔC_a и $\Delta \theta C_b$ достаточно малы, и пренебрегая на этом основании произведением ($\Delta C_a \cdot \Delta \theta C_b$), равенство (10) принимает вид

$$\Delta C_a = C_a \Delta \theta C_b. \quad (11)$$

Учитывая, что

$$C_a + C_b = 1, \quad (12)$$

и переходя к пределу при $\Delta \theta \rightarrow 0$, получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dC_a}{C_a(1 - C_a)} = d\theta. \quad (13)$$

Здесь $d\theta = \frac{dp}{\tau}$. Интегрирование с учетом усло-

вия $C_a = C_{a0}$ при $\theta = 0$ после преобразований приводит к расчетной формуле для определения C_a в зависимости от безразмерного параметра времени $\theta = \frac{p}{\tau}$

$$C_a = \frac{C_{a0} \exp \theta}{1 + C_{a0} (\exp \theta - 1)}. \quad (14)$$

С учетом уравнений (12) и (14) доля пор в объеме (пористость) уплотняемого почвогрунта может быть определена как

$$\begin{aligned} C_b = 1 - C_a &= 1 - \frac{C_{a0} \exp \theta}{1 + C_{a0} (\exp \theta - 1)} = \\ &= \frac{1 - C_{a0}}{1 + C_{a0} (\exp \theta - 1)} = \frac{C_{b0}}{C_{b0} (1 - \exp \theta) + \exp \theta}. \end{aligned} \quad (15)$$

Практическое применение зависимости (15) предусматривает необходимость определения $\theta = \frac{p}{\tau}$, т. е. параметр τ , который может рассматриваться как некоторая технологическая константа. Чтобы найти параметр τ , достаточно по результатам пробного уплотнения почвогрунта экспериментально определить его пористость C_{b0} до начала уплотнения и пористость C_b после уплотнения при фиксированном давлении p . Затем, учитывая, что $\theta = \frac{p}{\tau}$, определить параметр τ с помощью (15).

С методологической точки зрения для практического применения полученных зависимостей важно определить типичные значения исследуемых характеристик. Физически безразмерная величина C_b есть пористость грунта. Согласно принятой классификации в ГОСТ 25100–2011 Грунты. Классификация в зависимости от значений пористости почвогрунт подразделяется на четыре категории:

- 1) непористый, $n \leq 3 \%$;
- 2) слабопористый, $3 \% < n \leq 10 \%$;
- 3) среднепористый, $10 \% < n \leq 30 \%$;
- 4) сильнопористый, $n > 30 \%$.

Здесь $n = 100 C_b \%$.

В числе других характеристик почвогрунтов используется также коэффициент пористости (относительная пористость). С учетом уравнений (14) и (15) получаем

$$e = \frac{C_b}{C_a} = \frac{C_{b0}}{C_{a0} \exp \theta} = \frac{C_{b0}}{(1 - C_{b0}) \exp \theta}. \quad (16)$$

С практической точки зрения в целях обоснования рекомендаций по строительству лесной дороги с использованием местных почвогрунтов важно определить взаимосвязь пористости с изменением толщины слоя уплотняемого почвогрунта.

Моделирование влияния пористости на толщину слоя почвогрунта при его уплотнении

Используемый для строительства лесной дороги почвогрунт до его уплотнения является весьма рыхлым и сильнопористым. Необходимость дозирования нагрузок на материал в процессе строительства дороги объясняется наличием существенных различий в изменении пористости рыхлого и плотного почвогрунтов при их уплотнении.

В рамках рассматриваемой модели уплотнение слоя рыхлого почвогрунта достигается за счет уменьшения его пористости C_b (15), более плотной упаковки частиц и появления остаточных (необратимых) деформаций (см. рис. 3). Модель

является приближенной, поскольку не учитывается дилатансия почвогрунта, которая может иметь место при избыточно больших нагрузках на стадии эксплуатации дороги (на стадии строительства — при ошибках проектирования и технологии). Дилатансия проявляется в расширении плотных песков при определенной величине сдвига и сжатии рыхлых песков. Увеличение объема почвогрунта при сдвиге называется положительной дилатансией, а сжатие — отрицательной дилатансией. При этом существует начальная пористость песка, которая при сдвиге не изменяется и называется критической [10].

В целях исследования влияния пористости почвогрунта на толщину слоя при его уплотнении можно применить компарментальный подход [26–27]. В рамках данного подхода исследуемая система подразделяется на взаимосвязанные отсеки, называемые компарментами, содержание определенной субстанции в каждом из которых представляет собой отдельную переменную системы [11, 22].

$b : C_b; V_b$	h_b	$C_b - \Delta C_b; V_b - \Delta V_b$	Δh
			$h_a - \Delta h$
$a : C_a; V_a$	h_a	$C_a - \Delta C_a; V_a$	h_a

Рис. 4. Определение осадки почвогрунта
Fig. 4. The estimation of soil and subsoil settlement

На рис. 4 некоторый объем почвогрунта представлен в виде двух компарментов, в одном из которых (a) условно сосредоточены все твердые частицы и пористость материала равна нулю, а в другом (b) — все поры.

Предположительно уплотнение почвогрунта не сопровождается горизонтальными перемещениями его частиц (боковыми деформациями), т. е. такими перемещениями можно пренебречь. В этом случае уменьшение объема уплотняемого слоя почвогрунта с точки зрения геометрии связано только с уменьшением толщины слоя, первоначально равной

$$h = h_a + h_b. \tag{17}$$

Тогда, по аналогии с выражениями (3) и (4) получаем

$$C_b = \frac{h_b}{h}; h_b = C_b h = C_b (h_a + h_b); h_b(1 - C_b) = C_b h_a,$$

или, с учетом уравнения (12)

$$h_b C_a = C_b h_a. \tag{18}$$

Равенство (19) выполняется в любой момент времени, в том числе при $t = t_0$

$$h_{b0} C_{a0} = C_{b0} h_{a0}. \tag{19}$$

Вследствие уменьшения объема пор и появления необратимых деформаций толщина слоя уменьшается на Δh , причем это уменьшение вызвано только изменением h_b , т. е. $\Delta h = \Delta h_b$, поскольку деформации твердых частиц в компарменте (a) не учтены. Поэтому $h_{a0} = h_a$. Принимая во внимание равенства (18) и (19), получаем

$$\frac{h_b}{h_a} = \frac{h_b}{h_{a0}} = \frac{C_b}{C_a}. \tag{20}$$

Поскольку $h_b = h_{b0} - \Delta h$, то

$$\frac{h_{b0} - \Delta h}{h_{a0}} = \frac{C_b}{C_a}. \tag{21}$$

Следовательно:

$$\Delta h = h_{b0} - h_{a0} \frac{C_b}{C_a} = h_{b0} - (h_0 - h_{b0}) = \frac{C_b}{C_a}. \tag{22}$$

Здесь $h_{b0} = C_{b0} h_0$. Тогда, с учетом уравнения (16), изменение толщины слоя уплотняемого почвогрунта будет равно

$$\Delta h = h_0 C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta} \right). \tag{23}$$

В предельных случаях, если $\theta = 0$, то $\Delta h = 0$; если $\theta \rightarrow \infty$, то $\Delta h \rightarrow h_0 C_{b0}$.

Используя равенство (23), определяем относительное изменение толщины слоя уплотняемого почвогрунта:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta} \right). \tag{24}$$

Начальная толщина слоя уплотняемого почвогрунта h_0 в равенстве (23) определяется с учетом результатов экспериментов, технологии и опыта строительства. Реалистичные значения h_0 могут находиться в интервале от 30 до 50 см.

Из формул (24) и (25) следует, что если $\theta \rightarrow \infty$, то $\Delta h \rightarrow h_0 C_{b0}$ и $\varepsilon \rightarrow C_{b0}$. В этом случае пористость материала в компарменте (a) по рис. 4 равна нулю. Однако такая пористость при уплотнении реальных почвогрунтов недостижима, поскольку существует максимальная плотность, достижимая при оптимальной влажности почвогрунта [10].

Таким образом, по аналогии с известным подходом к корректировке параметров моделей в механике грунтов [23], полученные по формулам (23) и (24) значения следует умножить на безразмерный эмпирический коэффициент, обозначенный ξ , $0 < \xi < 1$:

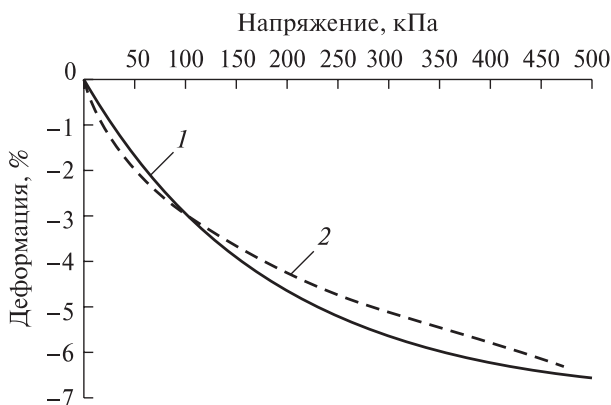


Рис. 5. Результаты расчета по предлагаемой методике (1) и известные экспериментальные данные (2)

Fig. 5. Calculation results by the proposed method (1) and known experimental data (2)

$$\Delta h = \xi h_0 C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta} \right); \quad (25)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \xi C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta} \right). \quad (26)$$

Параметры τ и ξ рекомендуется определять по следующей методике:

- 1) определить пористость грунта C_{b0} ;
- 2) создать постоянное давление p на образец или на участок слоя почвогрунта толщиной h_0 и экспериментально определить осадку Δh по истечении достаточно большого времени, когда изменениями напряжений и деформаций вследствие реологических свойств почвогрунта можно пренебречь. Тогда в формуле (25) можно принять

$\theta = \infty, \frac{1}{\exp \theta} = 0$. Получаем $\Delta h = \xi h_0 C_{b0}$, откуда

$\xi = \frac{\Delta h}{h_0 C_{b0}}$. При расчетной нагрузке указанными

изменениями деформаций пренебрегают, если данная нагрузка вызывает изменение относительной деформации не более 1%; данная рекомендация методологически аналогична исключению из расчетов приближающегося к асимптоте фрагмента гиперболы [18];

- 3) уменьшить давление на почвогрунт, например, в 2 раза и определить осадку Δh (что можно выполнить на втором шаге методики). Далее, используя найденное на втором шаге значение ξ и формулу (25), методом подбора определить такое значение θ , при котором осадка будет равна измеренному значению. Затем найти $\tau = \frac{p}{\theta}$.

Приведем пример, в котором $C_{b0} = 0,39$; $\xi = 0,18$; $\tau = 182$ кПа. Результаты вычислений относитель-

ной деформации ε по формуле (26) отражены в графической форме (сплошная линия) на рис. 5. На этом же рисунке представлены экспериментальные данные [18].

Результаты и обсуждение

Уплотняющее воздействие движителей лесных машин — актуальная тема, которой уделено внимание в работах отечественных и зарубежных авторов. Предлагаемая методика расчета имеет некоторые особенности, приведенные и обоснованные в ближайшем изложении. С учетом прикладных аспектов рассмотренной методики моделирования уплотняемого почвогрунта приближенно определено давление p . В рамках технологии строительства лесных дорог, предусматривающей перемещение земляных масс из боковых (придорожных) канав и резервов в тело земляного полотна [9], уплотнение выполняется при контактом давлении тыльной частью ковша экскаватора, в результате чего сила контактного взаимодействия может составить половину веса экскаватора. При этом если масса экскаватора 17 000 кг и площадь контакта тыльной части ковша экскаватора с подстилающим материалом при его уплотнении примерно 1 м², то в данном частном случае давление на почвогрунт по площади контакта будет равно

$$p = \frac{17\,000 \cdot 9,81}{2 \cdot 1} = 83385 \text{ Па} \approx 83,4 \text{ кПа}.$$

Более подробные данные о моделировании лесохозяйственных машин и экскаваторов, а также анализ сил, возникающих при их функционировании, приведены в литературных источниках [22, 24, 26]. В качестве примера был рассмотрен одноковшовый гусеничный гидравлический экскаватор Hyundai R220LC-9A:

- 1) массой 22 250 кг;
- 2) усилием копания ковша 152 кН;
- 3) массой, которую выдерживает стрела, 13,5 т (в рамках исследования это означало, что наибольшая сила контактного давления при уплотнении грунта тыльной поверхностью ковша составляет 135 кН);
- 4) длиной стрелы 6,2 м.

В пояснение некоторых особенностей уплотнения почвогрунта дорожного полотна по предлагаемой технологии [9] рассмотрена и приведена конкретная технологическая ситуация (рис. 6): экскаватор оказывает давление тыльной поверхностью ковша на почвогрунт; при этом давление максимально при данном положении стрелы.

Вес P и площади A_1 и A_2 могут быть определены по техническим характеристикам экскаватора. Расстояния от центра тяжести экскаватора до центров тяжести площадок A_1 и A_2 обозначены соответственно a и c .

Из условий статического равновесия следует, что

$$p_1 = \frac{Pc}{A_1(a+c)}, \quad (27)$$

$$p_2 = \frac{Pa}{A_2(a+c)}. \quad (28)$$

Моделирование работы землеройно-транспортной дорожно-строительной машины проведено на примере экскаватора HOLLAND E135BSR, обладающего следующими техническими характеристиками:

- эксплуатационная масса 14 700 кг;
- вес 144 207 Н;
- гусеничная база 3,045 м;
- ширина гусениц 0,5 м;
- максимальный вылет стрелы 8,830 м;
- вместимость ковша 1 м³.

С учетом приведенных технических характеристик экскаватора, а также условных обозначений (см. рис. 6) рассмотрены две технологические ситуации, в одной из которых вылет стрелы минимально допустимый, а в другой — максимально возможный. В ситуации 1 (см. ниже) расстояние минимально допустимо и равно $c = 2,1$ м. В ситуации 2 (см. ниже) расстояние максимально возможно и равно $c = 8,8$ м. Вес $P = 144\,207$ Н. Расстояние a принято равным половине гусеничной базы: $a = 1,5$ м. Опора движителя машины на почвогрунт может осуществляться как по всей длине гусеницы (тогда давление на почвогрунт минимально), так и на части ее длины (тогда давление на почвогрунт будет больше минимального). Смоделирована ситуация, когда давление гусениц на почвогрунт близко к максимально возможному давлению, что, как показал наш опыт строительства экспериментальной лесной дороги, соответствует площади опирания задних частей двух гусениц A_1 порядка 1 м² (передняя часть гусениц экскаватора приподнята, часть нагрузки передается на почвогрунт через тыльную часть ковша). Площадь A_2 опирания тыльной части коша на почвогрунт при его уплотнении в принятой модификации экскаватора примерно равна 1 м².

Технологическая ситуация 1

Давление под гусеницами:

$$p_1 = \frac{Pc}{A_1(a+c)} = \frac{144\,207 \cdot 2,1}{1(1,5+2,1)} = 84\,121 \text{ Па.}$$

Давление под ковшом:

$$p_2 = \frac{Pa}{A_2(a+c)} = \frac{144\,207 \cdot 1,5}{1(1,5+2,1)} = 60\,086 \text{ Па.}$$

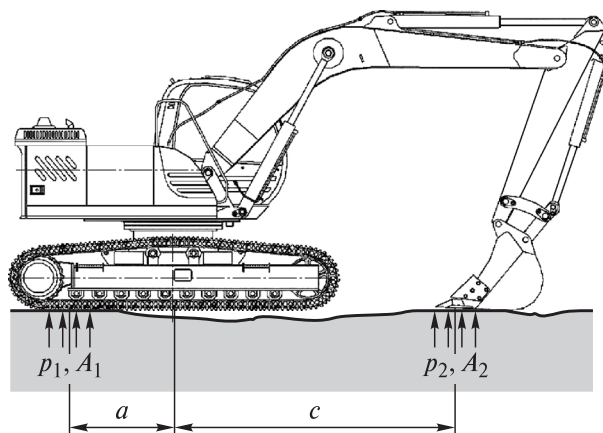


Рис. 6. К расчету уплотняющего давления ковша и гусениц на уплотняемый почвогрунт: P — вес экскаватора, распределяется на площадки A_1 и A_2 ; p_1 и A_1 — давление на почвогрунт и площадь контакта гусениц; p_2 и A_2 — давление на почвогрунт и площадь контакта тыльной части ковша

Fig. 6. To the calculation of the compaction pressure of the hoe and tracks on the compacted soil: P — the weight of the excavator, distributed to sites A_1 and A_2 ; p_1 and A_1 — pressure on the soil and the contact area of the tracks; p_2 and A_2 — pressure on the soil and the contact area of the rear of the hoe

Технологическая ситуация 2

Давление под гусеницами:

$$p_1 = \frac{Pc}{A_1(a+c)} = \frac{144\,207 \cdot 8,8}{1(1,5+8,8)} = 123\,206 \text{ Па.}$$

Давление под ковшом:

$$p_2 = \frac{Pa}{A_2(a+c)} = \frac{144\,207 \cdot 1,5}{1(1,5+8,8)} = 21\,001 \text{ Па.}$$

Таким образом, в случае максимального вылета стрелы при использовании экскаватора в режиме уплотнения наибольшее давление на почвогрунт имеет место под гусеницами (123 206 Па), а под ковшом давление минимально (21 001 Па). Если вылет стрелы минимальный, то наибольшее давление на почвогрунт также имеет место под гусеницами (84 121 Па), при этом под ковшом давление на уплотняемый почвогрунт равно 60 086 Па.

Определив давление на почвогрунт, можно с использованием зависимости (26) вычислить осадку Δh . Таким образом, для максимального из найденных выше значений давления и значений показателей $\xi = 0,71$; $h_0 = 0,4$ м; $C_{b0} = 0,43$; $\tau = 51\,000$ Па осадка составит:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \xi h_0 C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta} \right) = \\ &= 0,71 \cdot 0,4 \cdot 0,43 \left(1 - \frac{1}{\exp \left(\frac{123\,206}{51\,000} \right)} \right) = 0,111 \text{ м.} \end{aligned}$$

Сложность теоретического исследования уплотняемого почвогрунта объясняется тем, что в течение всего процесса приложения внешней нагрузки среда деформируется и при каждом циклическом приложении нагрузки «набирает» прочность и, как следствие, постоянно изменяет свои свойства [22].

Выводы

Разработана модель уплотнения слоя почвогрунта в системе «уплотняющее устройство — уплотняемый материал». При этом почвогрунт рассмотрен как неоднородный пористый материал. Для моделирования уплотнения такого материала использован новый в данной области прикладных исследований компартментальный подход. Выполнено моделирование влияния пористости на толщину слоя почвогрунта при его уплотнении. Разработана методика определения зависимости, связывающей степень уплотнения почвогрунта с изменением его пористости и деформаций. Практическое значение разработанной модели уплотнения слоя почвогрунта и методики оценки его деформаций подтверждено при использовании на стадиях проектирования и мониторинга строительства опытного участка лесной дороги [9, 21].

Список литературы

- [1] Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653>. (дата обращения 09.06.2021).
- [2] Герасимов Ю.Ю., Катаров В.К. Лесные дороги. Йоэнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2011. 70 с.
- [3] Сюнев В.С., Катаров В.К., Рожин Д.В., Герасимов Ю.Ю. Рациональное лесопользование: экология, биоэнергетика, инфраструктура // Леса Евразии – Белорусское Поозерье: Материалы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 145-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова, Москва; Браслав, 30 сентября–06 октября 2012 г. Москва; Браслав: МГУЛ, 2012. С. 40–43.
- [4] Катаров В.К., Карпов В.А. Совершенствование технологии строительства лесных дорог с применением отходов заготовки и переработки древесины // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 20 марта 2017 г. Пенза: Наука и просвещение, 2017. С. 32–36.
- [5] Камусин А.А., Кондрашова Е.В., Левушкин Д.М., Бурмистров В.А. Ресурсное обеспечение процесса строительства, ремонта и содержания участков лесных автомобильных дорог // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. № 2 (101). С. 21–27.
- [6] Шегельман И.Р., Будник П.В. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа // ИВУЗ Лесной журнал, 2021. № 1. С. 120–137.
- [7] Симоненков М.В., Салминен Э.О., Бачериков И.В. Оптимизация ежемесячного планирования лесных грузопотоков // Resources and Technology, 2016. Т. 13. № 3. С. 1–29.
- [8] Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С., Соколов А.П. Алгоритмы определения оптимальных маршрутов на графах для решения задач управления системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Resources and Technology, 2010. Т. 8. С. 30–33.
- [9] Ковалева Н.В. Опыт строительства и эксплуатации лесной дороги с заданными прочностными характеристиками // В мире научных открытий, 2015. № 10.1 (70). С. 511–520.
- [10] Болдырев Г.Г., Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах). Пенза: Изд-во ПГУАС, 2009. 412 с.
- [11] Логвенков С.А., Штейн А.А. Компартментальное моделирование транспортных процессов в корне растений, учитывающее присутствие пограничных слоев // Российский журнал биомеханики, 2013. Т. 17. № 4 (62). С. 37–46.
- [12] Akgul M., Demir M., Akay A.E. Analyzing dynamic curve widening on forest roads // Journal of Forestry Research, 2017, v. 28, no. 2, pp. 411–417.
- [13] Макаров П.В. Эволюционная природа деструкции твердых тел и сред // Физическая мезомеханика, 2007. Т. 10. № 3. С. 23–38.
- [14] Сушков С.И., Бурмистрова О.Н. Применение геосинтетических и геопластиковых материалов в дорожном строительстве. Воронеж: Изд-во ВГЛУ, 2016. 128 с.
- [15] Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы. Методы. Технологии, 2014. № 4 (24). С. 122–126.
- [16] Калужский Я.А., Батраков О.Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1970. 160 с.
- [17] Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояния вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
- [18] Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей // Вестник Томского государственного университета, 2013. № 367. С. 190–194.
- [19] Хасанов Р.Р., Гиниятуллин Р.Р. Экспериментальные исследования деформативности водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагрузениях // Изв. Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2008. № 2 (10). С. 85–89.
- [20] Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе PLAXIS 2D // Инженерно-строительный журнал, 2014. № 4 (48). С. 10–16.
- [21] Ковалева Н.В. Обоснование технологических решений строительства лесных дорог по критерию прочности дорожного полотна // Уч. зап. Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки, 2015. № 6 (151). С. 111–113.
- [22] Салминен Э.О. Лесные дороги. Справочник / под ред. Э.О. Салминена. СПб.: Лань, 2012. 496 с.
- [23] Строкова Л.А. Корректировка параметров упругости упруго-пластической модели путем моделирования лабораторных испытаний // Изв. Томского политехнического университета, 2009. Т. 315. № 1. С. 87–92.
- [24] Александров В.А., В.И. Варва, Г.Ш. Гасымов. Моделирование технологических процессов лесохозяйственных машин. С.-Пб.: Изд-во СПбГЛТА, 2004. 95 с.
- [25] Савельев С.В. Исследования напряженно-деформируемого состояния упруго-вязкой среды при вибрационном нагружении // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, 2012. № 25. С. 83–87.
- [26] Svenson G., Fjeld D. The impact of road geometry and surface roughness on fuel consumption of logging trucks // Scandinavian J. of Forest Research, 2016, v. 31, no. 5, pp. 526–536.
- [27] Stefanou S.S., Kastellakis G., Poirazi P. Creating and Constraining Compartmental Models of Neurons Using Experimental Data / Advanced Patch-Clamp Analysis for Neuroscientists, 2016, pp. 325–343. DOI:10.1007/978-1-4939-3411-9_15

Сведения об авторах

Катаров Василий Кузьмич — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации строительства Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, vkatarov@petsu.ru

Алешина Наталья Владимировна — канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры технологии и организации строительства Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, kovaleva_natalia@petsu.ru

Сюнев Владимир Сергеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, syunev@petsu.ru

Ратькова Елена Игоревна — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации строительства Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, ratjkova@mail.ru

Марков Владимир Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации строительства Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, vmarkov@petsu.ru

Поступила в редакцию 10.07.2021.

Принята к публикации 14.09.2021.

ASSESSMENT OF SOIL COMPACTED STATE IN FOREST ROAD COSTRUCTION

V.K. Katarov, N.V. Aleshina, V.S. Syunev, E.I. Rat'kova, V.I. Markov

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185910, Petrozavodsk, Russia

vkatarov@petsu.ru

The issue of soil compacted state forecasting during the construction of a forest road is considered. The mechanical system formation of contacting particles of the compacted soil are given and substantiated. A model of compaction of a loose soil layer in the system "compaction device - compacted material" has been developed. A new compartment approach in this field of applied research was used, within which the system under study is subdivided into interconnected units, called compartments, the content of a certain substance in each of them is a separate variable of the system. Various technological situations are analyzed with the minimum and maximum allowable boom outreach of the excavator. The modeling of the effect of porosity on the soil layer thickness during its compaction, denser packing of particles and the appearance of residual (irreversible) deformations has been carried out. A method for determining the relationship between the degree of soil compaction and changes in its porosity and deformations has been developed. The complexity of the theoretical study of the compacted soil is substantiated. The practical significance of the developed model of soil layer compaction and the methodology for assessing its deformations has been confirmed with successful implementation at the design and monitoring stages of the construction of a pilot section of a forest road located in the Republic of Karelia on the basis of Petrozavodsk State University.

Keywords: forest road, cyclical influence, consolidation of soil and subsoil layer

Suggested citation: Katarov V.K., Aleshina N.V., Syunev V.S., Rat'kova E.I., Markov V.I. *Otsenka uplotnennogo sostoyaniya pochvo-gruntov pri stroitel'stve lesnoy dorogi* [Assessment of soil compacted state in forest road construction]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 106–117.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-106-117

References

- [1] *Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Strategies for the development of the Russian Federation forestry complex for the period up to 2030]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573658653>. (accessed 09.06.2021).
- [2] Gerasimov Yu.Yu., Katarov V.K. *Lesnye dorogi* [Forest roads]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute, 2011, 70 p.
- [3] Syunev V.S., Katarov V.K., Rozhin D.V., Gerasimov Yu.Yu. *Ratsional'noe lesopol'zovanie: ekologiya, bioenergetika, infrastruktura* [Rational forest management: ecology, bioenergy, infrastructure]. *Lesa Evrazii — Belorusskoe Poozer'e: Materialy XII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova* [Forests of Eurasia — Belarusian Poozerie. Materials of the XII International Conference of Young Scientists dedicated to the 145th anniversary of the birth of Professor G.F. Morozov], Moscow; Braslav, 30 sentyabrya–06 oktyabrya 2012 g. Moscow–Braslav: MSFU, 2012, pp. 40–43.

- [4] Katarov V.K., Karpov V.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'stva lesnykh dorog s primeneniem otkhodov zagotovki i pererabotki drevesiny* [Improvement of the technology of construction of forest roads with the use of waste wood harvesting and processing]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya: teoriya, metodologiya, praktika* sbornik statey VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative research activities: theory, methodology, practices. Collected works of VI International Research-to-Practice Conference]. 2017, pp. 32–36.
- [5] Kamusin A.A., Kondrashova E.V., Levushkin D.M., Burmistrov V.A. *Resursnoe obespechenie protsessa stroitel'stva, remonta i sodержaniya uchastkov lesnykh avtomobil'nykh dorog* [Resource support for the construction, repair and maintenance of forest road sections]. *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*, 2014, no. 2 (101), pp. 21–27.
- [6] Shegel'man I.R., Budnik P.V. *Tipizatsiya lesnykh territoriy po prirodno-proizvodstvennym usloviyam na osnove klaster'nogo analiza* [Typification of forest areas according to natural production conditions based on cluster analysis]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2021, no. 1, pp. 120–137.
- [7] Simonenkov M.V., Salminen E.O., Bacherikov I.V. *Optimizatsiya ezhemesyachnogo planirovaniya lesnykh gruzopotokov* [An optimization model for monthly timber flow planning]. *Resources and Technology*, 2016, v. 13, no. 3, pp. 1–29.
- [8] Gerasimov Yu.Yu., Syuney V.S., Sokolov A.P. *Algoritmy opredeleniya optimal'nykh marshrutov na grafakh dlya resheniya zadach upravleniya sistemami transportirovki drevesiny dlya lesopromyshlennogo kompleksa i bioenergetiki* [Algorithms for optimal paths finding on the graphs with reference to different forest logistics tasks in the forest sector and bioenergy]. *Resources and Technology*, 2010, v. 8, pp. 30–33.
- [9] Kovaleva N.V. *Opyt stroitel'stva i ekspluatatsii lesnoy dorogi s zadannymi prochnostnymi kharakteristikami* [Experience practice of the forest road construction and operation with desired structural properties]. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the world of scientific discoveries], 2015, no. 10.1 (70), pp. 511–520.
- [10] Boldyrev G.G., Malyshev M.V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamente (v voprosakh i otvetakh)* [Soil engineering. Foundation engineering (in questions and answers)]. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2009, 412 p.
- [11] Logvenkov S.A., Shteyn A.A. *Kompartmental'noe modelirovanie transportnykh protsessov v korne rasteniya, uchityvayushchee prisutstvie pogranichnykh sloev* [Compartmental modeling of transport processes in the plan root, taking into account the presence of boundary layers]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian J. of Biomechanics], 2013, part 17, no. 4 (62), pp. 37–46.
- [12] Akgul M., Demir M., Akay A.E. Analyzing dynamic curve widening on forest roads. *J. of Forestry Research*, 2017, v. 28, no. 2, pp. 411–417.
- [13] Makarov P.V. *Evolutsionnaya priroda destruktivnykh tel i sred* [Evolutionary nature of destruction of solids and media]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physics mesomechanics], 2007, v. 10, no. 3, pp. 23–38.
- [14] Sushkov S.I., Burmistrova O.N. *Primenenie geosinteticheskikh i geoplasticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve* [Application of geosynthetic and geoplastic materials in road construction]. Voronezh: VGLTU, 2016, 128 p.
- [15] Khitrov E.G., Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A. *Raschet nesushchei sposobnosti lesnykh pochvogruntov pod vozdeystviem koleznykh dvizhiteley* [Calculation of load-bearing capacity for forest potting soils influenced by the wheeled running gears]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 4 (24), pp. 122–126.
- [16] Kaluzhskiy Ya.A., Batrakov O.T. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Compaction of subgrade and road pavements]. Moscow: Transport, 1970, 160 p.
- [17] Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyaniya voprosa* [Methods for determining the mechanical properties of soil. Follow-up on the issue]. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2008, 696 p.
- [18] Strokova L.A. *Opredelenie parametrov deformiruемости gruntov dlya uprugoplasticheskikh modeley* [Determination of soil deformability parameters for elastoplastic models]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2013, no. 367, pp. 190–194.
- [19] Khasanov R.R., Giniyatullin R.R. *Eksperimental'nye issledovaniya deformativnosti vodonasyshchennykh glinistykh gruntov pri tsiklicheskikh nagruzheniyyakh* [Experimental studies of the deformability of water-saturated clay soils under cyclic loading]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2008, no. 2 (10), pp. 85–89.
- [20] Sokolova O.V. *Podbor parametrov gruntovykh modeley v programnom komplekse PLAXIS 2D* [Parameters selection of soil models in the PLAXIS 2D software package]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Construction-engineering Journal], 2014, no. 4 (48), pp. 10–16.
- [21] Kovaleva N.V. *Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy stroitel'stva lesnykh dorog po kriteriyu prochnosti dorozhnogo polotna* [Substantiation of technological concepts in forest road construction by the strength modulus]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Petrozavodsk State University transactions. Series: Natural and technical sciences], 2015, no. 6 (151), pp. 111–113.
- [22] Salminen E.O. *Lesnye dorogi. Spravochnik* [Forest road. Guidebook]. Ed. E.O. Salminen. St. Petersburg: Lan', 2012, 496 p.
- [23] Strokova L.A. *Korrektirovka parametrov uprugosti uprugo-plasticheskoy modeli putem modelirovaniya laboratornykh ispytaniy* [Adjustment of elasticity parameters of elasto-plastic model by laboratory test simulation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2009, v. 315, no. 1, pp. 87–92.
- [24] Aleksandrov V.A., V.I. Varava, G.Sh. Gasymov *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov lesokhozyaystvennykh mashin* [Simulation of technological processes of forestry machines]. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Forest Technical University, 2004, 95 p.
- [25] Savel'ev S.V. *Issledovaniya napryazhenno-deformiruемого sostoyaniya uprugo-vyazkoy sredy pri vibratsionnom nagruzhении* [Investigations of the stress-strain state of an elastic-viscous medium under vibration loading]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy], 2012, no. 25, pp. 83–87.

- [26] Svenson G., Fjeld D. The impact of road geometry and surface roughness on fuel consumption of logging trucks. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2016, v. 31, no. 5, pp. 526–536.
- [27] Stefanou S.S., Kastellakis G., Poirazi P. Creating and Constraining Compartmental Models of Neurons Using Experimental Data. *Advanced Patch-Clamp Analysis for Neuroscientists*, 2016, pp. 325–343. DOI:10.1007/978-1-4939-3411-9_15

Authors' information

Katarov Vasilii Kuz'mich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology and construction arrangements, Institute of Forest, mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, vkatarov@petsu.ru

Aleshina Natalia Vladimirovna — Cand. Sci. (Tech.), Senior Lecturer of the Department of Technology and construction arrangements, Institute of Forest, mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, kovaleva_natalia@petsu.ru

Syunev Vladimir Sergeevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Transport and technological machines and equipment, Institute of Forest, mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, siunev@petsu.ru

Rat'kova Elena Igorevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology and construction arrangements, Institute of Forest, mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, ratjkova@mail.ru

Markov Vladimir Ivanovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology and construction arrangements, Institute of Forest, mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, vmarkov@petsu.ru

Received 10.07.2021.

Accepted for publication 14.09.2021.