

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>

УДК 630* 624.131.4:624.138.22



Экспериментальное исследование эволюции поля напряжений в грунте при катковом уплотнении

Дмитрий В. Васильев¹, uasya-1993@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>
Альберт М. Бургонутдинов¹, burgonutdinov.albert@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>
Евгений В. Сибиряткин², jeu-sib@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>
Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>
Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Комсомольский просп., д. 29, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема отсутствия детерминированной модели, связывающей эволюцию поля напряжений в грунте с кинетикой наработки плотности при многопроходном катковом уплотнении, что актуально для оптимизации строительства лесных дорог. Целью работы является установление количественных закономерностей этого процесса для разработки критериев выбора технологических параметров. Для её достижения была разработана комплексная методика полевого эксперимента, основанная на синхронной регистрации интегральных характеристик (осадка, плотность) и компонент напряжённо-деформированного состояния с помощью тензометрических датчиков и метода меловых маяков. Исследования проводились на супеси, суглинке и щебне при варьировании толщины слоя, скорости движения и числа проходов.

В результате экспериментально выделены три стадии эволюции напряжённого состояния, отражающие переход от пластических деформаций к упругим. Установлен универсальный затухающий гиперболический характер зависимости максимального нормального напряжения от числа проходов, описываемый моделью $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$. Обнаружена двугорбая форма эпюры касательных напряжений и выявлена значительная анизотропия релаксации остаточных напряжений: горизонтальные напряжения исчезают за 18–20 часов, в то время как вертикальные релаксируют почти мгновенно. Полученные результаты углубляют теорию контактного взаимодействия и предоставляют практические критерии для определения оптимального числа проходов и сроков контроля качества уплотнения.

Ключевые слова: лесные дороги, уплотнение грунта, катковое уплотнение, поле напряжений, остаточные деформации, контроль качества

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Экспериментальное исследование эволюции поля напряжений в грунте при катковом уплотнении / Д. В. Васильев, А. М. Бургонутдинов, Е. В. Сибиряткин, О. А. Куницкая, Е. А. Тихонов // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 127–140. – Библиогр.: с. 137–139 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>.


Поступила 14.09.2025. Пересмотрена 15.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.


Experimental investigation of stress field evolution in soil under roller compaction

Dmitry V. Vasilyev¹, uasya-1993@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>

Albert M. Burgonutdinov¹, burgonutdinov.albert@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

Evgeny V. Sibiryatkin²,  jey-sib@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tihonov@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹ Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation

³ Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Abstract

The article examines the problem of the absence of a deterministic model linking the evolution of the stress field in the soil with the kinetics of density gain during multi-pass roller compaction, which is relevant for optimizing the construction of forest roads. The purpose of the work is to determine the quantitative patterns of this process to develop criteria for selecting technological parameters. To achieve this purpose, an integrated field experiment methodology was developed, based on the synchronous registration of integral characteristics (sediment, density) and the stress-strain state component using tensometric sensors and the chalk beacon method. Studies were conducted on sandy loam, loam, and gravel, varying the thickness of the layer, the speed of movement, and the number of passes. As a result, three stages of stress state evolution were experimentally identified, reflecting the transition from plastic deformations to elastic ones. The universal damped hyperbolic nature of the dependence of the maximum normal stress on the number of passages, described by the model $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$, has been revealed. The two-humped form of the tangential stresses diagram was discovered, and a significant anisotropy of residual stress relaxation was revealed: horizontal stresses disappear within 18-20 hours, while vertical stresses relax almost instantaneously. The obtained results deepen the theory of contact interaction and provide practical criteria for determining the optimal number of passes and the timing of compaction quality control.

Keywords: forest roads, soil compaction, roller compaction, stress field, residual deformations, quality control

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Vasiliev D. V., Borgonutdinov A. M., Sibiryatkin E. V., Kunitskaya O. A., Tikhonov E. A. (2026). Experimental investigation of stress field evolution in soil under roller compaction. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 127–140 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>.

Received 14.09.2025.

Revised 16.01.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Несмотря на длительную историю эксплуатации вибрационных катков в дорожном строительстве, в научно-технической сфере сохраняется дефицит консенсуса относительно оптимальных параметров данной техники, объективных критериев оценки её технологической эффективности и рациональных режимов работы в

разнообразных производственных условиях [1, 2]. Эта неоднозначность обусловлена фундаментальной сложностью и недостаточной изученностью физических процессов, сопровождающих вибрационное уплотнение. К ним относятся: нелинейное поведение грунтовой среды, характеристики которой динамически изменяются от прохода к проходу; комплексное взаимодействие элементов колебательной системы катка как между

собой, так и с деформируемым основанием; значительное разнообразие типов грунтов и технологических контекстов, в которых осуществляется уплотнение [2].

Динамическое взаимодействие вибрационного катка с грунтовым основанием представляет собой сложный процесс, определяемый совокупностью технических параметров машины и реологических свойств уплотняемой среды. Ключевыми факторами со стороны катка являются масса вальца и рамы, частота и амплитуда колебаний, геометрические характеристики вальца, параметры амортизирующей системы и скорость передвижения. Со стороны грунта существенное влияние оказывают его тип, гранулометрический состав, начальная плотность, влажность и мощность уплотняемого слоя. В рамках экспериментального исследования эволюции поля напряжений для строительства лесных дорог принципиально важным является выбор адекватного математического аппарата, способного описать отклик нелинейной, многофазной среды на циклическое динамическое воздействие.

Физическая сущность вибрационного катка как многомассовой колебательной системы, работающей в контакте с деформируемым основанием, обуславливает применение методов реологического моделирования. Эти методы позволяют аппроксимировать поведение системы через совокупность сосредоточенных масс, упругих, вязких и пластических элементов, моделирующих как свойства техники, так и грунта. Эволюция напряжённо-деформированного состояния в процессе многократных проходов катка может быть проанализирована через призму развития таких моделей.

Исторически первым и наиболее простым подходом явилось использование одномассных моделей, в которых основное внимание уделялось динамике самого рабочего органа [3, 4, 5]. Однако подобные схемы обладали ограниченной предсказательной силой, так как не учитывали обратного влияния деформируемого грунта на характер колебаний. Развитием методологии стало внедрение двухмассных моделей, которые позволили рассматривать систему «вальец–грунт» как единое целое [6, 7, 8]. Эти модели стали важным шагом в понимании передачи энергии от катка в массив и формирования начального поля напряжений. Для более глубокого анализа распространения волн напряжений по глубине и оценки присоединённой массы вовлекаемого в движение грунтового массива были предложены трёхмассные реологические схемы [12, 13, 14]. Подобное усложнение модели повышает её адекватность при описании второй фазы

взаимодействия — распространения и затухания напряжений в глубине уплотняемого слоя, что особенно важно для обоснования оптимальной толщины отсыпаемого слоя на лесных дорогах.

Среди разнообразия реологических схем для аппроксимации поведения грунта фундаментальное значение сохраняет линейная вязкоупругая модель Фойгта. Её широкое применение, включая анализ виброплит [11] и динамику фундаментов [24, 25, 26], основано на удачном балансе между аналитической простотой и возможностью описания ключевых релаксационных свойств грунта. Применительно к вибрационным каткам, модель Фойгта эффективно описывает формирование контактных напряжений и их динамику при однократном нагружении [5, 12, 13]. Эмпирические исследования, охватывающие широкий спектр грунтов, показывают, что для значительного числа случаев линейная модель даёт удовлетворительное соответствие экспериментальным данным [27]. Это подтверждает её пользу для моделирования «характерного цикла нагружения» — ключевого элемента в изучении кумулятивного эффекта от многократных проходов.

Однако для всестороннего описания эволюции поля напряжений, особенно на стадиях интенсивного пластического деформирования и при уплотнении специфических грунтов (например, заторфованных или переувлажнённых), линейные модели могут быть недостаточны. В таких случаях привлекаются более сложные нелинейные реологические конструкции [18, 19, 20], способные учитывать пластическое течение, упрочнение материала и зависимость параметров от уровня и скорости нагружения. Развитие этих моделей [21, 22, 23] направлено на создание инструмента, позволяющего не только фиксировать, но и прогнозировать кинетику изменения поля напряжений и связанной с ним плотности грунта в процессе всего цикла уплотнения, что является конечной целью оптимизации технологии строительства лесных дорог.

Для всестороннего описания эволюции поля напряжений, особенно на стадиях интенсивного пластического деформирования и при уплотнении специфических грунтов (например, заторфованных или переувлажнённых), линейные модели могут быть недостаточны. В таких случаях привлекаются более сложные нелинейные реологические конструкции [18], способные учитывать пластическое течение, упрочнение материала и зависимость параметров от уровня и скорости нагружения. Развитие этих моделей [21-23] направлено на создание инструмента, позволяющего не только фиксировать, но и прогнозировать кинетику изменения поля напряжений и связанной с ним плотности грунта в процессе всего цикла

уплотнения, что является конечной целью оптимизации технологии строительства лесных дорог.

Современные исследования, направленные на решение этой задачи, реализуют комплексный подход, опирающийся на симбиоз трёх ключевых направлений: технологий интеллектуального уплотнения, методов машинного обучения и численного моделирования [19]. Прогресс в области интеллектуального уплотнения (ИУ) предоставляет необходимую эмпирическую основу. Оборудованные акселерометрами и GNSS-приёмниками катки в режиме реального времени фиксируют отклик грунта, формируя плотный поток объективных данных о его жёсткости, которая тесно коррелирует с плотностью, для каждого прохода и участка [20]. Современные системы управления, такие как Bomag Variocontrol, не только собирают эти данные, но и автоматически адаптируют параметры работы (например, амплитуду вибрации), обеспечивая равномерное уплотнение [21].

Для трансформации собранных данных в прогнозные модели активно применяются алгоритмы машинного обучения (МО). Ансамблевые методы, такие как градиентный бустинг (XGBoost), демонстрируют высокую точность ($R^2 > 0.9$) в предсказании ключевых параметров уплотнения, включая оптимальную влажность и максимальную плотность, на основе гранулометрического состава и данных Аттерберга [22]. Продвинутое исследование показывает возможность создания глобальных прогнозных моделей, способных оценивать параметры уплотнения связных грунтов для широкого спектра приложенной энергии [23,24].

Таким образом, интеграция данных в реальное время от систем ИУ с физически обоснованными реологическими моделями через инструментарий машинного обучения формирует основу для создания адаптивной системы управления. Такая система позволяет перейти от эмпирического подбора режимов к научно обоснованному прогнозу и оптимизации всего цикла уплотнения, что является определяющим фактором для строительства долговечных лесных дорог.

Понимание дискретных фаз взаимодействия «каток-грунт» и в развитии методов корреляции данных [1, 2, 17, 18, 19, 23]. Однако ключевой научной проблемой остаётся отсутствие детерминированной количественной модели, связывающей пространственно-временную эволюцию поля напряжений (эволюцию нормальных и касательных компонент) с кинетикой накопления плотности в материале в процессе всего цикла многопроходного уплотнения. Существует разрыв между пониманием единичного цикла нагружения [5, 12, 13] и способностью

прогнозировать кумулятивный технологический эффект для разнородных грунтов в условиях строительства лесных дорог.

Настоящее экспериментальное исследование направлено на преодоление этого пробела. Его целью является установление количественных закономерностей эволюции напряжённо-деформированного состояния (НДС) в дорожно-строительных материалах при катковом уплотнении для разработки критериев оптимизации технологических параметров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать и апробировать комплексную методику полевого эксперимента, позволяющую преодолеть методологическое ограничение, связанное с невозможностью прямого неразрушающего контроля плотности в фиксированной точке после каждого прохода.
2. Экспериментально исследовать стадийность процесса уплотнения на основе синхронной регистрации интегральных характеристик (вертикальная осадка, плотность) и компонент НДС (нормальные и касательные напряжения) в массиве грунта.
3. Выявить и математически описать функциональные зависимости между технологическими параметрами (число проходов, толщина слоя, скорость) и эволюцией ключевых параметров поля напряжений.
4. Исследовать характер релаксации остаточных напряжений в уплотнённом слое и оценить их влияние на процедуру контроля конечной плотности.

В основе исследования лежит гипотеза о том, что процесс уплотнения представляет собой последовательную смену качественно различных фаз механического поведения грунтовой среды, объективно фиксируемую через трансформацию поля напряжений. Предполагается, что эволюция напряжённого состояния характеризуется тремя стадиями, соответствующими переходу от пластических деформаций к упругим, а зависимость пиковых напряжений от числа проходов носит затухающий гиперболический характер. Также гипотезой предусматривается, что релаксация остаточных напряжений обладает выраженной анизотропией, что необходимо учитывать при оценке результатов уплотнения.

Материалы и методы

Программа экспериментальных исследований была направлена на изучение процесса уплотнения дорожно-строительных материалов катками. Исследования включали проведение контролируемых полевых экспериментов.

1. Объекты исследования

В качестве уплотняемых материалов были выбраны:

- Супесчаный грунт (однородный по гранулометрическому составу).
- Лёгкий суглинок (испытывался в наиболее широком диапазоне режимов).
- Щебень двух типов: гранитный и известковый.

2. Подготовка экспериментального участка и материалов

Эксперименты проводились на специально подготовленном участке лесовозной дороги. Полоса длиной 30 м и шириной 4 м была спланирована в горизонтальной плоскости с нивелирным контролем и предварительно уплотнена до относительной плотности 0.98 от максимальной стандартной (по ГОСТ). Для фиксации геометрии слоя и размещения измерительной аппаратуры по границам полосы была установлена деревянная обноска. Исследуемый материал укладывался ровным слоем заданной толщины (контролируемой по обноске). Перед испытанием отбирались пробы для определения исходных физико-механических характеристик: гранулометрического состава, плотности в рыхлом состоянии, влажности и др. Влажность материалов поддерживалась в оптимальном диапазоне: для суглинка — 13–17%, для супеси — 10–12%.

3. Методика проведения процесса уплотнения

Уплотнение осуществлялось последовательно двумя самоходными катками: первые 8–10 проходов выполнялись катком массой 3.7 т, последующие 11–20 проходов — катком массой 10 т. Процесс продолжался до прекращения наблюдаемой осадки слоя и прироста его плотности. Исследовались следующие варьируемые параметры (табл.1.).

Для всесторонней оценки процесса уплотнения применялся комплекс методов, направленный на параллельную регистрацию интегральных (результатирующих) характеристик уплотняемого слоя и локальных параметров его напряжённо-деформированного состояния (НДС). Мониторинг интегральных деформационно-прочностных характеристик включал контроль вертикальной осадки, плотности грунта и геометрии поверхности. Вертикальная осадка слоя фиксировалась после каждых двух проходов катка с помощью высокоточного нивелирования или механического прогибомера, обеспечивавшего точность до 1 мм. Плотность грунта определялась с аналогичной периодичностью; первичные замеры выполнялись стандартным методом режущих колец (ГОСТ 28514-90) с последующим лабораторным анализом, что гарантировало точность до 0.01 г/см³.

4. Методы контроля и измерительная аппаратура

Для построения непрерывной зависимости плотности от числа проходов без разрушения структуры в контрольной точке использовался косвенный калибровочный метод, основанный на корреляции с измеряемыми напряжениями и осадками. Геометрия поверхности опытной полосы фиксировалась геодезическим нивелированием до начала, выборочно в процессе и после завершения уплотнения.

Исследование напряжённо-деформированного состояния в массиве грунта основывалось на косвенном подходе, что было обусловлено методологической невозможностью прямого неразрушающего измерения распределения плотности в одной точке после каждого цикла нагружения. Суть подхода заключалась в изучении динамики полей напряжений для последующего установления эмпирических корреляционных связей с конечной плотностью. Для раздельной регистрации нормальных (σ) и касательных (τ) напряжений применялись специально разработанные тензометрические датчики (мессдозы) с гидравлическим преобразователем. Чувствительные элементы этих датчиков, выполненные в виде плоских камер, заполнялись рабочей жидкостью; давление жидкости, пропорциональное механическому напряжению, преобразовывалось в электрический сигнал. В подготовленный слой на различных глубинах было установлено восемь датчиков. Четыре горизонтально ориентированных датчика предназначались для измерения вертикальных нормальных напряжений, а ещё четыре вертикально установленных датчика фиксировали горизонтальные касательные напряжения. Все датчики располагались в одной вертикальной плоскости вдоль направления движения катка с шагом 1 метр между точками измерений. Процедура измерений учитывала различие в картине НДС, формируемой ведомым и ведущим вальцами, поэтому замеры проводились раздельно для каждого вальца при его нахождении над контролируемой точкой. Аналоговые электрические сигналы с датчиков в реальном времени записывались на фоторегистрирующем осциллографе, а для оперативного визуального контроля при каждом чётном проходе катка фиксировались показания микроамперметра, включённого в измерительную цепь.

Таблица 1

Варьируемые параметры процесса уплотнения

Table 1

Variable parameters of the sealing process

Материал / Material	Толщина уплотняемого слоя, см / Compacted Layer Thickness, cm	Скорость движения катка, км/ч / Roller Speed, km/h	Влажность, W ₀ % / Moisture Content, W ₀ %	Примечания / Remarks
Легкий суглинок / Light Loam	15	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
	20	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
	25	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
Супесчаный грунт / Sandy Loam	20	Данные не указаны / Not specified	10–12	Проведена одна базовая серия опытов / One baseline test series was conducted
Щебень (гранитный и известковый) / Crushed Stone (Granite & Limestone)	15	0,45; 0,60; 0,90	–	
	22	0,45; 0,60; 0,90	–	

Для прямой экспериментальной оценки величины и характера горизонтальных смещений частиц грунта по глубине был применён метод меловых индикаторных маяков. Маяк представлял собой монолитный цилиндр, предварительно сформированный из сухого порошкообразного мела, диаметром 30 мм и высотой, строго равной толщине уплотняемого слоя. Вертикальные колонны-маяки устанавливались в шурфы до начала укатки, а после завершения процесса уплотнения в местах их закладки производились продольные раскопки (разрезы). Деформированное состояние маяков документировалось путём зарисовок, фотографирования и точного замера линейных смещений их отдельных участков, что позволило

количественно оценить эпюру распределения горизонтальных сдвигов по глубине уплотняемого слоя.

5. Порядок проведения серии опытов и обоснование методологии

Каждая серия экспериментов представляла собой завершённый цикл, начинавшийся с подготовки материала в строго нормированных начальных условиях и заканчивавшийся комплексом измерений на уплотнённом состоянии. После фиксации всех конечных параметров уплотнённого слоя — геодезической съёмки поверхности, демонтажа и контроля показаний тензометрических датчиков, а также вскрытия и документации

деформации меловых маяков — материал подвергался тщательному разрыхлению. Последующая подготовка к новому опыту, включавшая повторное увлажнение, перемешивание и укладку слоя заданной толщины, обеспечивала идентичность его начального состояния. Этот циклический характер процедуры был фундаментальным условием, гарантирующим воспроизводимость результатов и позволяющим проводить сравнительный анализ влияния варьируемых технологических параметров (толщины слоя, скорости движения, числа проходов) при прочих равных начальных условиях.

Избранный комплексный методологический подход, интегрирующий традиционные методы контроля интегральных характеристик с прямыми измерениями напряженно-деформированного состояния (НДС) и визуализацией внутренних сдвигов, был обусловлен необходимостью преодоления ключевого методического противоречия. Прямое послойное определение плотности в одной и той же точке после каждого прохода катка является деструктивным методом, который нарушает структуру материала и делает невозможным наблюдение за его реакцией на последующие воздействия. Предложенная методика устраняет это ограничение путем перехода от прямой регистрации плотности к изучению её косвенных, но непрерывно измеряемых коррелятов — полей механических напряжений и картин смещений. Такой косвенный корреляционный подход позволил неинвазивно, в реальном масштабе времени эксперимента, отслеживать физическую сущность процесса уплотнения — перераспределение и уплотнение скелета грунта под внешней нагрузкой. Установление количественных связей между динамикой напряжений, величиной горизонтальных подвижек и конечными деформационно-прочностными показателями слоя создает фундаментальную основу для разработки физически обоснованных критериев оптимизации, таких как рациональная толщина отсыпаемого слоя и энергетически эффективные режимы работы уплотняющей техники при строительстве лесных дорог.

Результаты

Реализация разработанной комплексной методики, основанной на синхронном мониторинге интегральных параметров и компонент напряженно-деформированного состояния (НДС), позволила получить принципиально новые результаты в исследовании кинетики процесса уплотнения дисперсных материалов. Применение данного подхода обеспечило не только количественную характеристику конечного состояния уплотнённого

массива, но и возможность реконструкции полной динамики его формирования, что открыло путь к установлению фундаментальных физических закономерностей данного технологического процесса.

Ключевым научным достижением работы стало экспериментальное выявление и обоснование трёх последовательных характерных стадий эволюции поля механических напряжений в грунтовом слое при его уплотнении цилиндрическим катком. Данная стадийность объективно отражает фазовый переход механического поведения материала от режима развитого пластического течения к преобладанию упругого отклика.

Первая стадия (начального формообразования) соответствует начальному воздействию катка. На этом этапе регистрируется интенсивное накопление остаточных (пластических) деформаций при минимальном вкладе деформаций упругих. Распределение (эпюра) контактных нормальных напряжений σ_{zz} носит резко выраженный асимметричный характер относительно вертикальной оси зоны контакта, с чётко локализованным максимумом, смещённым в направлении движения рабочего органа.

Вторая стадия (активного упрочнения) наступает с увеличением числа проходов и сопровождается прогрессирующим ростом плотности грунта. Наблюдается закономерное увеличение абсолютной величины максимальных нормальных напряжений (σ_{max}). При этом, вследствие повышения однородности и несущей способности материала, происходит постепенное уменьшение асимметрии эпюры напряжений.

Третья стадия (стабилизации) формируется по завершении процесса плотностного уплотнения, когда приращение плотности материала становится пренебрежимо малым. Деформирование на этой стадии носит исключительно упругий, обратимый характер. Величина σ_{max} достигает своего предельного, стабильного значения и далее не зависит от количества дополнительных проходов катка. Эпюра напряжений асимптотически приближается к симметричному виду. Важно отметить, что момент стабилизации величины σ_{max} находится в строгом соответствии с моментом стабилизации коэффициента сопротивления перекатыванию катка, что указывает на установление динамического равновесия в системе «рабочий орган – уплотняемая среда».

Таким образом, представленные результаты дают целостную физическую картину процесса уплотнения, устанавливая однозначную корреляцию между макроскопическими силовыми параметрами

процесса, эволюцией поля напряжений и фазовыми изменениями в поведении материала.

1. Зависимость максимального нормального напряжения от числа проходов

Анализ изменения σ_{max} в зависимости от числа проходов катка (N) при уплотнении слоев различной толщины (15, 20, 25 см) и различных скоростях движения показал затухающий характер этой зависимости.

В качестве иллюстрации приведены данные для слоя толщиной 15 см при скорости 0.90 км/ч.

Значения σ_{max} на различной относительной глубине (0.25H, 0.5H, 0.75H, H) демонстрируют однотипную динамику, различаясь абсолютными величинами. Так, при первом проходе напряжения составляли 2.94, 1.805, 1.28, 1.24 кгс/см² соответственно. К третьему проходу они возросли в ~1.5 раза (4.08, 2.558, 2.03, 1.99 кгс/см²). При пятом проходе рост относительно третьего замедлился до 1.1 раза, а к седьмому и девятому проходам составил лишь 1.02 и 1.01 раза соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения максимального нормального напряжения (σ_{max}) для слоя H=15 см, V=0.90 км/ч

Table 2

Average values of maximum normal stress (σ_{max}) for a layer with H=15 cm, V=0.90 km/h

Число проходов, N / Number of Passes, N	σ_{max} , опытное, кгс/см ² / σ_{max} , experimental, kgf/cm ²	N/ σ_{max}	σ_{max} , расчетное, кгс/см ² / σ_{max} , calculated, kgf/cm ²	Отклонение, кгс/см ² / Deviation, kgf/cm ²
1	1.82	0.5494	1.90	+0.08
3	2.67	1.1232	2.66	-0.01
5	2.90	1.7241	2.88	-0.02
7	2.96	2.3365	2.97	+0.01
9	3.02	2.9805	3.021	

Источник/Source: расчеты авторов / authors' calculations.

На основании характера кривой, асимптотически приближающейся к постоянному значению, зависимость $\sigma_{max}(N)$ была аппроксимирована уравнением гиперболического типа:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{a_4 + b_4 N}. \quad (1)$$

Линеаризация зависимости (1) в координатах N/ σ_{max} от NN подтвердила адекватность выбранной модели, так как экспериментальные точки легли на прямую линию (рис. 1).

Обработка данных методом наименьших квадратов для приведенного примера позволила определить коэффициенты $a_4=0.2168$, $b_4=0.3052$. Таким образом, расчетная формула приняла вид

$$\frac{N}{\sigma} = a_4 + b_4 N. \quad (2)$$

Построив на графике точки с координатами $x = N$ и $y = \frac{N}{\sigma}$ убедились, что все точки располагаются почти на одной прямой, что служит доказательством правильности нашего предположения. Составив систему уравнений по данным опыта, определяем значение коэффициентов " a_4 " и " b_4 "

$$0,5494 = a_4 + b_4. \quad (3)$$

$$1,2320 = a_4 + 3b_4. \quad (4)$$

$$1,7241 = a_4 + 5b_4. \quad (5)$$

$$2,3365 = a_4 + 7b_4. \quad (6)$$

$$2,9805 = a_4 + 9b_4. \quad (7)$$

$$3,397 = 3a_4 + 9b_4. \quad (8)$$

$$5,3170 = 2a_4 + 16b_4. \quad (9)$$

Решая эту систему получим $a_4 = 0.2168$; $b_4 = 0,3052$ окончательно

$$\sigma_{max} = \frac{N}{0.2168 + 0.3052N}. \quad (10)$$

Аналогичные расчеты, выполненные для всех серий опытов, подтвердили универсальность уравнения (1) для различных толщин уплотняемого слоя и скоростей движения катка.

2. Характер изменения касательных напряжений

Экспериментально установлено, что эпюра касательных напряжений (τ), возникающих в элементарном объеме грунта при проходе катка, имеет двугорбый вид с двумя максимумами: τ_1 (до прохода оси катка) и τ_2 (после прохода оси катка) (Рисунок 1). Это свидетельствует о двукратном возникновении и смене направления касательных напряжений в частице за один цикл нагружения.

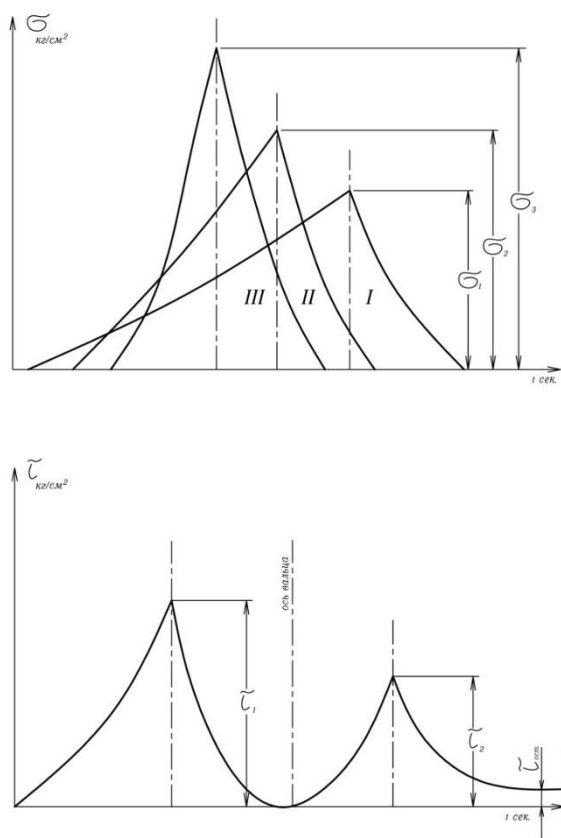


Рисунок 1. Эпюра касательных напряжений
Figure 1. Tangential stress plot

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Источник: составлено авторами

Наибольшие пластические подвижки частиц наблюдались при первом проходе, когда грунт находился в рыхлом состоянии, несмотря на минимальные величины τ . С увеличением числа проходов и ростом плотности, значения τ_1 и τ_2 возрастали по всей толщине слоя. Однако вследствие одновременного увеличения сил сцепления между частицами, пластические деформации (подвижки) затухали вплоть до полного прекращаения.

Величина τ_2 во всех опытах составляла 30–50% от τ_1 . Рост τ_1 и τ_2 с уплотнением носил неравномерный характер по глубине: у поверхности слоя напряжение возрастало примерно в 1.5 раза, в то время как у основания — лишь на 10%. Распределение τ по глубине было неравномерным: разница между значениями у поверхности и у основания слоя составляла 25–40%. Абсолютные значения максимальных нормальных напряжений превышали максимальные касательные в 3–4 раза.

3. Остаточные напряжения

После снятия нагрузки в уплотненном слое фиксировались остаточные напряжения, обусловленные релаксацией упругих деформаций в вертикальном и горизонтальном направлениях. Скорость релаксации существенно различалась: остаточные вертикальные напряжения исчезали в течение ~ 1 с, в то время как горизонтальные сохранялись в течение 18–20 часов.

По величине остаточные вертикальные напряжения составляли 2–3% от σ_{\max} , а горизонтальные — около 5% от τ_{\max} . Указанная анизотропия скорости релаксации связана с различием в условиях восстановления формы: в вертикальном направлении сопротивление оказывает только вес вышележащего грунта, а в горизонтальном — практически неограниченный массив.

Таким образом, для корректной оценки достигнутой плотности отбор проб укатанного грунта рекомендуется производить не ранее чем через 20–24 часа после окончания уплотнения, по завершению процесса релаксации остаточных горизонтальных напряжений.

Обсуждение

Проведённый эксперимент и полученные результаты предоставляют возможность для углублённой интерпретации механизмов, лежащих в основе процесса статического уплотнения связных грунтов цилиндрическим катком. Анализ данных позволяет установить взаимосвязь между наблюдаемыми физическими явлениями, фундаментальными теоретическими положениями механики грунтов и практическими аспектами нормирования дорожно-строительных работ. Выделенные в ходе эксперимента три последовательные стадии уплотнения отражают качественную трансформацию механического поведения грунтовой среды. Начальная стадия, характеризуемая преимущественно пластическими деформациями и асимметричной эпюрой нормальных напряжений, соответствует фазе активного перераспределения и вытеснения газовой фазы из межагрегатных пор системы. С позиций классической механики грунтов это согласуется с моделью развития зон пластичности под действием жёсткого штампа, когда происходит радикальная перестройка скелета грунта. Последующее симметрирование эпюры напряжений и переход к упругой стадии деформирования означают собой формирование нового, более устойчивого состояния грунтового каркаса с повышенным количеством контактов между частицами. На этой стадии дальнейшее удаление воздуха становится крайне затруднительным, что теоретически приближает

систему к предельному состоянию, описываемому кривой оптимального соотношения влажности и плотности для двухфазной «грунтовой массы». Обнаруженная синхронная стабилизация максимального контактного напряжения и коэффициента сопротивления перекачиванию имеет непосредственное практическое значение. Она выступает объективным технологическим критерием, сигнализирующим о достижении предельной для данных условий эффективности уплотнения и, как следствие, определяющим оптимальное число проходов катка, исключающее непроизводительные затраты.

Установленная гиперболическая зависимость между пиковым нормальным напряжением и числом проходов катка находит своё теоретическое обоснование в принципах контактного взаимодействия и нелинейного деформирования дисперсных сред. Затухающий характер роста напряжений является прямым отражением снижения эффективности передачи энергии от рабочего органа к грунтовому основанию по мере его уплотнения и уменьшения доступного объёма удаляемого воздуха. Универсальный вид аппроксимирующей формулы указывает на то, что эмпирические коэффициенты являются интегральными параметрами. Они аккумулируют в себе совокупное влияние ключевых факторов: начальной плотности и влажности грунта, гранулометрического состава, а также параметров воздействия (массы катка, ширины вальца), определяющих статическую линейную нагрузку. Таким образом, данная зависимость служит математической моделью, связывающей технологические параметры процесса с реакцией конкретного грунтового материала.

Полученные данные по распределению касательных напряжений, в частности наличие двух выраженных максимумов, наглядно подтверждают сложный, двухфазный характер контактного воздействия цилиндрического вальца. Эта картина соответствует теоретическим представлениям о зональном деформировании грунта, при котором одновременно происходят процессы сжатия под вальцом и сдвига в прилегающих областях. Выявленная в эксперименте значительная временная анизотропия релаксации остаточных напряжений требует объяснения с позиций реологии грунтов. Неполное удаление воздушной фазы и наличие защемлённого воздуха, характерное даже для качественно уплотнённых связных грунтов, создаёт предпосылки для длительных процессов перераспределения напряжений в скелете. Различная скорость релаксации в разных направлениях может быть обусловлена

анизотропией граничных условий и исходной структуры грунта, а также проявлением таких свойств, как ползучесть и релаксация. Это явление напрямую связывает кратковременный эффект уплотнения с долговременными характеристиками основания — его длительной прочностью и стабильностью деформаций, что является критически важным для прогнозирования эксплуатационной надёжности дорожной конструкции.

Таким образом, экспериментальные результаты обладают высокой степенью внутренней согласованности и хорошо вписываются в существующий теоретический фундамент механики грунтов. Установленные закономерности — от макроскопической стадийности процесса до конкретного вида функциональных зависимостей и особенностей распределения остаточных напряжений — предоставляют не только объяснение физической сути явления, но и практический инструментарий. Они позволяют обоснованно подходить к выбору технологических параметров уплотнения (числа проходов, массы оборудования) в соответствии с типом грунта и требуемыми нормативами, способствуя тем самым оптимизации строительных процессов и обеспечению требуемой долговечности инженерных сооружений.

Заключение

На основании проведенного комплекса экспериментальных исследований процесса статического уплотнения дорожно-строительных материалов катками, включавшего изучение супесчаного грунта, легкого суглинка и щебня, были получены следующие основные выводы, имеющие как теоретическое, так и практическое значение.

1. Разработана и апробирована комплексная методика, преодолевающая ключевое методологическое ограничение — невозможность прямого неразрушающего контроля плотности в одной точке после каждого прохода. Сочетание традиционных методов (нивелирование, режущие кольца) с прямым измерением напряженно-деформированного состояния (НДС) с помощью тензометрических датчиков и визуализацией сдвигов методом меловых маяков позволило установить корреляционные связи между динамикой полей напряжений и конечными деформационно-прочностными характеристиками уплотняемого слоя.
2. Экспериментально установлены три характерные стадии эволюции напряженного состояния в связном грунте при уплотнении, коррелирующие с переходом деформаций из пластических в упругие:

- Начальная стадия: интенсивные остаточные деформации, асимметричная эпюра нормальных напряжений с максимумом, смещенным в сторону движения катка.
 - Стадия развития: рост максимальных нормальных напряжений (σ_{\max}) при уменьшении асимметрии эпюры.
 - Стадия стабилизации: прекращение прироста плотности, деформации носят упругий характер, σ_{\max} достигает постоянного значения, эпюра симметризуется. Момент стабилизации σ_{\max} совпадает со стабилизацией коэффициента сопротивления перекачиванию, что может служить объективным критерием окончания эффективного уплотнения.
3. Установлен затухающий гиперболический характер роста σ_{\max} от числа проходов катка (N). Получена универсальная для исследованных условий эмпирическая модель вида $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$, коэффициенты которой интегрируют влияние свойств материала и режима уплотнения. Выявлена двугорбая форма эпюры касательных напряжений с двумя максимумами (τ_1 и τ_2), что

подтверждает двухфазный характер воздействия цилиндрического вальца.

4. Обнаружена и оценена значительная временная анизотропия релаксации остаточных напряжений. Установлено, что горизонтальные остаточные напряжения ($\approx 5\%$ от τ_{\max}) релаксируют в течение 18–20 часов, в то время как вертикальные ($\approx 2-3\%$ от σ_{\max}) исчезают практически мгновенно. Это явление обусловлено различием граничных условий и имеет прямое практическое следствие: для корректной оценки достигнутой плотности отбор контрольных проб необходимо производить не ранее чем через 20–24 часа после окончания укатки.

Таким образом, результаты работы углубляют понимание механики статического уплотнения, вносят вклад в теорию контактного взаимодействия рабочего органа с дисперсной средой и предоставляют инженерно-значимые критерии для оптимизации технологических параметров (числа проходов, толщины слоя) и контроля качества при строительстве дорожных оснований.

Список литературы

1. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 202-216. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. New Criterion for Continuous Compaction Control Systems by Soil Vibratory Rollers. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_62.
3. Lipinski K. Forced Vibrations in a Dynamic System That Is Damped By a Mechanism Which Trans-Pass Through Its Singular Position. In: Awrejcewicz J. (eds) Perspectives in Dynamical Systems II — Numerical and Analytical Approaches. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 454. Springer, Cham, 2024. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56496-3_21.
4. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // Acta Geotech. – 2025. – Vol. 20. – P. 501–517. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>.
5. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades // Shock and Vibration. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.
6. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 6(94). – С. 706-716. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>.
7. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 9. – С. 30–36.
8. Paulmichl I., Furtmüller T., Adam C., Adam D. Numerical simulation of the compaction effect and the dynamic response of an oscillation roller based on a hypoplastic soil model // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 132. – Art. 106057. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106057>.
9. Li T., Wang G., Zhang Y. Design of Compaction Operation Monitoring System for Intelligent Vibratory Roller Based on Internet of Things // Engineering Proceedings. – 2021. – Vol. 10, № 1. – Art. 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11265>.

10. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебрянников В.С. Аналитическое обоснование кинематических характеристик вибровозбудителя дорожного виброролка // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 1. – С. 16-22.
11. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – Vol. 1. – Art. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>.
12. Rojas-Vivanco J., García J., Villavicencio G., Benz M., Herrera A., Breul P., Varas G., Moraga P., Gornall J., Pinto H. Artificial Intelligence Applied to Soil Compaction Control for the Light Dynamic Penetrometer Method // Mathematics. – 2025. – Vol. 13, № 21. – Art. 3359. – DOI: <https://doi.org/10.3390/math13213359>.
13. Debeleac C.N., Buraga A., Nastac S.M. Experimental and Numerical Study in Dynamic Compaction of Weakly-Cohesive Soils // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 22. – Art. 10129. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210129>.
14. Kurdyumov V.I. et al. [Title of the article] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1045. – Art. 012106. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012106>.
15. Yao J., Yue M., Ma H., Yang C. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 4. – Art. 2183. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042183>.
16. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 1(53). – С. 36–42. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-02-184-189>.
17. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads // Buildings. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. 2837. – DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>.
18. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-grained geomaterials: Proposal and comparative study // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 321. – Art. 126375. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>.
19. What Is Intelligent Compaction? // MyConstructionTechnology. – URL: <https://myconstructiontechnology.com/what-is-intelligent-compaction/> (дата обращения: 19.01.2026).
20. Roller Management System // Topcon Positioning Systems. – URL: <https://www.topconpositioning.com/us/en/solutions/infrastructure/earthmoving/intelligent-compaction> (дата обращения: 19.01.2026).
21. Новинки грунтовых катков. Уплотнение грунта. Что нового? // OS1.ru. – 2022. – URL: <https://os1.ru/article/2249-novinki-gruntovyh-katkov-uplotnenie-grunta-chto-novogo> (дата обращения: 19.01.2026).
22. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study / M. Y. et al. // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. number: 24018. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2>.
23. Big data-driven global modeling of cohesive soil compaction across conceptual and arbitrary energies through machine learning / K. Singh et al. // Transportation Geotechnics. – 2024. – Vol. 47. – Art. 101287. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101287>.
24. Интеллектуальные системы Bomag // Komek.ru. – 2018. – URL: <https://www.komek.ru/staty/intellektualnye-sistemy-bomag/> (дата обращения: 19.01.2026).

References

1. Tyuremnov I. S., Shorokhov D. A. Modelirovanie vzaimodeystviya vibratsionnogo katka s uplotnyaemym gruntom. [Modeling the interaction of a vibratory roller with compacted soil]. Vestnik SibADI = Bulletin of SibADI. 2024;21(2):202-216. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. New Criterion for Continuous Compaction Control Systems by Soil Vibratory Rollers. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_62.
3. Lipinski K. Forced Vibrations in a Dynamic System That Is Damped By a Mechanism Which Trans-Pass Through Its Singular Position. In: Awrejcewicz J. (eds) Perspectives in Dynamical Systems II — Numerical and Analytical Approaches. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 454. Springer, Cham, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56496-3_21.
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. Acta Geotechnica. 2025;20:501–517. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>.
5. Liu L., Liu C., Ai H., Luo J., Zhang W., Wang L. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades. Shock and Vibration. 2021;2021:9589230. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.

6. Tyuremnov I. S. Analiz tekhnicheskikh kharakteristik razlichnykh tipov udarno-vibratsionnykh gruntouplotnyayushchikh mashin. [Analysis of technical characteristics of various types of impact-vibration soil compacting machines]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2023;20(6):706-716. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>.
7. Tarasov V. N., Boyarkina I. V., Serebrennikov V. S. Vliyanie massy vertikal'nogo prigruga na amplitudu kolebaniy vibroval'tsa i vibrozashchitu ramy dorozhnogo katka. [Influence of the vertical ballast mass on the oscillation amplitude of the vibratory drum and on vibration protection of the roller frame]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Machinery. 2019;(9):30–36. (In Russ.).
8. Paulmichl I., Furtmüller T., Adam C., Adam D. Numerical simulation of the compaction effect and the dynamic response of an oscillation roller based on a hypoplastic soil model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020;132:106057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106057>.
9. Li T., Wang G., Zhang Y. Design of Compaction Operation Monitoring System for Intelligent Vibratory Roller Based on Internet of Things. Engineering Proceedings. 2021;10(1):50. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11265>.
10. Tarasov V. N., Boyarkina I. V., Serebrennikov V. S. Analiticheskoe obosnovanie kinematicheskikh kharakteristik vibrovozbuditelya dorozhnogo vibrokatka. [Analytical justification of the kinematic characteristics of the exciter for a road vibratory roller]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Machinery. 2019;(1):16-22. (In Russ.).
11. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities. 2023;1:2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>.
12. Rojas-Vivanco J., García J., Villavicencio G., Benz M., Herrera A., Breul P., Varas G., Moraga P., Gornall J., Pinto H. Artificial Intelligence Applied to Soil Compaction Control for the Light Dynamic Penetrometer Method. Mathematics. 2025;13(21):3359. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13213359>.
13. Debeleac C.N., Buraga A., Nastac S.M. Experimental and Numerical Study in Dynamic Compaction of Weakly-Cohesive Soils. Applied Sciences. 2024;14(22):10129. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210129>.
14. Kurdyumov V. I., Mal'tsev A. N., Manuylov V. A., Samoylov D. N., Shamray A. P. [Title of the article is required]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1045:012106. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012106>.
15. Yao J., Yue M., Ma H., Yang C. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction. Sensors. 2023;23(4):2183. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042183>.
16. Shishkin E. A., Smolyakov A. A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktного usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyaemym materialom. [Substantiation of the method of adjusting the contact force of the vibrating roller with the material being compacted]. Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies. 2022;(1):36–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-02-184-189>.
17. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads. Buildings. 2023;13(11):2837. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>.
18. Shi M., Zhao L., Zhang D., Cao Z., Xu H., Wang L. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-grained geomaterials: Proposal and comparative study. Construction and Building Materials. 2022;321:126375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>.
19. What Is Intelligent Compaction? My Construction Technology. URL: <https://myconstructiontechnology.com/what-is-intelligent-compaction/> (accessed: 19.01.2026).
20. Roller Management System. Topcon Positioning Systems. URL: <https://www.topconpositioning.com/us/en/solutions/infrastructure/earthmoving/intelligent-compaction> (accessed: 19.01.2026).
21. Novinki gruntovykh katkov. Uplotnenie grunta. Chto novogo? [New soil rollers. Soil compaction. What's new?]. OS1.ru. 2022. URL: <https://os1.ru/article/2249-novinki-gruntovyh-katkov-uplotnenie-grunta-chto-novogo> (accessed: 19.01.2026). (In Russ.).
22. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. Scientific Reports. 2025;15:24018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2>.
23. Big data-driven global modeling of cohesive soil compaction across conceptual and arbitrary energies through machine learning. Transportation Geotechnics. 2024;47:101287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101287>.
24. Intellektual'nye sistemy Bomag. [Intelligent Bomag systems]. Komek.ru. 2018. URL: <https://www.komek.ru/staty/intellektualnye-sistemy-bomag/> (accessed: 19.01.2026). (In Russ.).

Сведения об авторах

Васильев Дмитрий Вадимович – аспирант ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>, e-mail: uasya-1993@mail.ru.

Бургонутдинов Альберт Масугатович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

✉ *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация, 677007, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Тихонов Евгений Андриянович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Information about the authors

Dmitry V. Vasiliev – Postgraduate student of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>, e-mail: uasya-1993@mail.ru.

Albert M. Burgonutdinov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

✉ *Evgeny V. Sibiryatkin* – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@mail.ru.

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation, 677007, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author