



## **Критический анализ теоретических моделей уплотнения грунтов и выявление их ограничений при прогнозировании предельного состояния**

Дмитрий В. Васильев<sup>1</sup>, [uasya-1993@mail.ru](mailto:uasya-1993@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>

Альберт М. Бургонутдинов<sup>1</sup>, [burgonutdinov.albert@yandex.ru](mailto:burgonutdinov.albert@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

Евгений В. Сибиряткин<sup>2</sup>, [jey-sib@mail.ru](mailto:jey-sib@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Ольга А. Куницкая<sup>3</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

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

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

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация

Проведен комплексный анализ современных подходов к моделированию процесса уплотнения грунтов, актуальный для решения задач транспортного и промышленного строительства в условиях реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий". Исследование охватывает ключевые аспекты механики уплотнения с критической оценкой 6 основных теоретических моделей, включая решения Герца-Беляева, степенные зависимости и зонную модель Калужского.

Установлено, что существующие теоретические модели адекватно описывают лишь начальные стадии уплотнения, демонстрируя расхождение с экспериментальными данными до 45% при прогнозировании предельного состояния грунта. Выявлено фундаментальное противоречие: классические зависимости предсказывают неограниченный рост осадки при увеличении числа проходов катка свыше 15-20 циклов, что не соответствует данным натурных испытаний, показывающим стабилизацию плотности после 8-12 проходов.

На основе сравнительного анализа 23 экспериментальных исследований установлено, что современные модели не учитывают эволюцию прочностных характеристик грунта, что приводит к завышению расчетных значений осадки на 25-30%. Показана необходимость разработки новых адаптивных моделей, учитывающих изменение модуля деформации грунта в процессе уплотнения.

Полученные результаты имеют практическую значимость для цифровизации строительных процессов и могут быть использованы при создании интеллектуальных систем контроля уплотнения, позволяющих снизить энергозатраты на 15-20% и повысить точность прогнозирования несущей способности грунтовых оснований на 25%. Разработанные рекомендации актуальны для внедрения в практику строительства высокоскоростных магистралей и объектов инфраструктуры в сложных грунтовых условиях.

**Ключевые слова:** уплотнение грунтов, контактные напряжения, теория Герца-Беляева, коэффициент сопротивления перекатыванию, предельное состояние грунта, число проходов катка, деформационные характеристики грунтов, дорожное строительство, механика грунтов, моделирование процесса уплотнения

**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:** Критический анализ теоретических моделей уплотнения грунтов и выявление их ограничений при прогнозировании предельного состояния / Д.В. Васильев, А.М. Боргонутдинов, Е.В. Сибиряткин, О.А. Куницкая // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 356-367. – Библиогр.: с. 365-367 (17 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/21>.

*Поступила* 14.04.2025. *Пересмотрена* 15.10. 2025. *Принята* 30.11.2025. *Опубликована онлайн* 26.12.2025.

Article

## **Critical Analysis of Theoretical Models of Soil Compaction and Identification of Their Limitations in Predicting the Ultimate State**

**Dmitry V. Vasilyev**<sup>1</sup>, [uasya-1993@mail.ru](mailto:uasya-1993@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>

**Albert M. Burgonutdinov**<sup>1</sup>, [burgonutdinov.albert@yandex.ru](mailto:burgonutdinov.albert@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

**Evgeny V. Sibiryatkin**<sup>2</sup>, [jey-sib@mail.ru](mailto:jey-sib@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

**Olga A. Kunitskaya**<sup>3</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Ave., 29, Perm, 614990, Russian Federation

<sup>2</sup> Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

<sup>3</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

### **Abstract**

A comprehensive analysis of modern approaches to modeling soil compaction processes has been conducted, relevant for addressing tasks in transport and industrial construction within the framework of national projects "Safe and High-Quality Roads" and "Integrated Development of Territories". The research covers key aspects of compaction mechanics with a critical assessment of 6 main theoretical models, including the Hertz-Belyaev solutions, power-law relationships, and Kaluzhsky's zonal model.

It has been established that existing theoretical models adequately describe only the initial stages of compaction, demonstrating up to 45% discrepancy with experimental data when predicting the ultimate soil state. A fundamental contradiction has been identified: classical dependencies predict unlimited settlement growth with increasing roller passes beyond 15-20 cycles, which contradicts field test data showing density stabilization after 8-12 passes.

Based on a comparative analysis of 23 experimental studies, it has been determined that modern models do not account for the evolution of soil strength characteristics, leading to overestimation of calculated settlement values by 25-30%. The necessity of developing new adaptive models that consider changes in soil deformation modulus during compaction has been demonstrated.

The obtained results have practical significance for the digitalization of construction processes and can be used in creating intelligent compaction control systems, potentially reducing energy costs by 15-20% and improving the accuracy of predicting soil foundation bearing capacity by 25%. The developed recommendations are relevant for

implementation in the construction practice of high-speed highways and infrastructure facilities in complex soil conditions.

**Keywords:** *soil compaction, contact stresses, Hertz-Belyaev theory, rolling resistance coefficient, ultimate soil state, number of roller passes, soil deformation characteristics, road construction, soil mechanics, compaction process modeling*

**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. Critical Analysis of Theoretical Models of Soil Compaction and Identification of Their Limitations in Predicting the Ultimate State. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 356-367 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/21>.

**Received** 14.04.2025.    **Revised** 15.10.2025.    **Accepted** 30.11. 2025.    **Published online** 26.12.2025.

### Введение

Актуальность проблемы. Комплексный анализ современных подходов к моделированию процесса уплотнения грунтов представляет стратегическую важность для реализации масштабных инфраструктурных проектов в Российской Федерации. В условиях активного развития транспортной системы и реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий" проблема эффективного уплотнения грунтов приобретает особую значимость [1]. Современные требования к качеству строительства дорожных одежд и земляных сооружений диктуют необходимость разработки новых, более точных методов прогнозирования поведения грунтов в процессе уплотнения [2,3].

Особую актуальность данное исследование получает в свете задач по импортозамещению и развитию отечественных технологий в дорожном строительстве. Отсутствие надежных расчетных моделей, адаптированных к российским грунтовым условиям и современной уплотняющей технике, приводит к значительным экономическим потерям и снижению долговечности строительных объектов [4,5].

Уплотнение грунтов представляет собой сложный физико-механический процесс, характеризующийся нелинейным поведением трехфазной дисперсной системы. Фундаментальная сложность задачи заключается в необходимости одновременного учета реологических свойств грунтовой массы, кинетики изменения структурных связей и динамики перераспределения фазовых компонентов [6,7].

Исторический анализ позволяет выделить три основных этапа развития теории уплотнения [8-10]. Эмпирико-статистический этап характеризовался накоплением экспериментальных данных и разработкой первых нормативных зависимостей, где ключевым достижением стало введение метода стандартного уплотнения Проктора [9]. Аналитический этап связан с развитием теорий контактного взаимодействия на основе решений Герца-Беляева [11], однако эти модели оказались ограниченно применимы для описания поведения упруго-пластичных грунтовых сред. Современный комплексный этап ознаменовался появлением зонных моделей Калужского [12,13] и развитием компьютерного моделирования, однако даже эти подходы не позволяют адекватно описать процесс уплотнения на всех его стадиях.

Существующие теоретические модели демонстрируют принципиальные расхождения с экспериментальными данными по достижению предельного состояния уплотнения [14-16]. Наблюдается противоречие между дискретным характером моделей и непрерывностью реального процесса уплотнения, а также между статическими параметрами моделей и динамической природой изменения свойств грунта.

Исследование предлагает системный подход к анализу ограничений существующих моделей и обоснованию необходимости разработки адаптивной модели, учитывающей эволюцию деформационных характеристик грунта и накопление пластических деформаций. Практическая значимость работы определяется возможностью создания на ее основе интеллектуальных систем контроля уплотнения и оптимизированных технологических карт производства работ.

Цель исследования - проведение критического анализа существующих теоретических моделей контактного взаимодействия вальца с грунтом и разработка концептуальных основ новой адаптивной модели, позволяющей корректно прогнозировать поведение грунта в процессе многократного нагружения.

### **Материалы и методы исследования**

Методологической основой исследования выступил системный анализ современных теоретических представлений о механике процесса уплотнения грунтов. В работе применен комплексный подход, интегрирующий методы сравнительного моделирования, математического анализа и верификации теоретических положений экспериментальными данными.

Научная новизна методологии заключается в разработке критериев оценки адекватности существующих расчетных моделей, основанных на сопоставлении теоретических предсказаний с результатами натурных испытаний. Для установления корреляционных зависимостей между параметрами уплотняющего воздействия и деформационными характеристиками грунтов использованы аппарат нелинейной регрессии и методы вариационной статистики.

Экспериментальная составляющая исследования базируется на метаанализе репрезентативной выборки научных публикаций, охватывающей широкий спектр грунтовых условий и технологических режимов уплотнения. Верификация теоретических моделей осуществлялась посредством сравнения с данными инструментальных измерений контактных напряжений и деформационных параметров.

Особенностью примененной методологии является учет реологических свойств грунтовой среды и их трансформации в процессе многократного нагружения. Для анализа кинетики изменения структурных связей использованы современные представления механики деформируемого твердого тела с учетом специфики трехфазных дисперсных систем.

Математический аппарат исследования включает методы решения контактных задач теории упругости и пластичности, адаптированные для описания поведения грунтовых сред. Для оценки достоверности полученных результатов применены критерии статистической значимости и методы проверки репрезентативности экспериментальных данных.

### **Результаты**

Проведенное комплексное исследование механизма уплотнения грунтов позволило установить фундаментальные закономерности, определяющие эффективность процесса уплотнения в зависимости от физико-механических свойств грунтовых сред и параметров технологического воздействия. Системный анализ существующих теоретических моделей в сопоставлении с экспериментальными данными выявил необходимость разработки уточненных расчетных зависимостей, адекватно описывающих поведение грунта при многократном нагружении.

В результате критического осмысления классических теорий контактного взаимодействия и современных подходов к моделированию процесса уплотнения сформирована целостная система уравнений, учитывающая реологические свойства грунтов, кинематические параметры уплотняющей техники и особенности распределения контактных напряжений в трехфазной дисперсной среде. Особое

внимание уделено верификации теоретических положений экспериментальными данными, что обеспечило достоверность полученных результатов и возможность их практического применения.

Разработанные модели и зависимости позволяют перейти от эмпирических оценок к научно обоснованному прогнозированию поведения грунтов в процессе уплотнения, что создает теоретическую базу для оптимизации технологических параметров и разработки энергоэффективных методов уплотнения в дорожном и промышленном строительстве.

**Экспериментальное определение оптимальных параметров уплотнения грунтов**

Проведенные исследования стандартного уплотнения по Проктору позволили установить четкие корреляционные зависимости между типом грунта и его уплотняемостью. Полученные данные (Таблица 1) демонстрируют существенные различия в поведении различных грунтовых сред под нагрузкой.

Таблица 1

Результаты определения оптимальных параметров уплотнения грунтов

Table 1

Results of determination of optimal soil compaction parameters / Результаты определения оптимальных параметров уплотнения грунтов

Тип грунта / Soil type	Оптимальная влажность, % / Optimal moisture content, %	Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup> / Maximum density, g/cm <sup>3</sup>	Диапазон изменения плотности / Density variation range
Песчаный / Sandy	7-11	1,60-1,95 / 1.60-1.95	±0,18 г/см <sup>3</sup> / ±0.18 g/cm <sup>3</sup>
Супесчаный / Sandy loam	9-14	1,65-1,95 / 1.65-1.95	±0,15 г/см <sup>3</sup> / ±0.15 g/cm <sup>3</sup>
Суглинистый / Loam	13-19	1,60-1,85 / 1.60-1.85	±0,13 г/см <sup>3</sup> / ±0.13 g/cm <sup>3</sup>

Тяжелый суглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	18-24	1,55-1,70 / 1.55-1.70	±0,08 г/см <sup>3</sup> / ±0.08 g/cm <sup>3</sup>
---	-------	-----------------------	---

**Анализ распределения контактных напряжений**

Экспериментальные исследования распределения контактных напряжений под рабочими органами уплотняющих машин выявили сложный характер взаимодействия в системе "валес-грунт". На рисунке 1 представлена схема распределения напряжений под колесом, демонстрирующая наличие трех характерных зон деформации.

Установлено, что максимальные контактные напряжения достигаются в зоне пластических деформаций, где наблюдается наиболее интенсивное уплотнение грунта. При этом распределение напряжений по площади контакта имеет куполообразный характер с максимумом, смещенным в направлении движения катка.

**Верификация теоретических моделей контактного взаимодействия**

Сравнительный анализ шести теоретических моделей показал различную степень их соответствия экспериментальным данным. Наибольшую точность продемонстрировала модифицированная теория Герца-Беляева, описываемая следующими зависимостями:

Максимальное контактное напряжение определяется как:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{q}{\pi R(V_1 + V_2)}} \quad (1)$$

где коэффициенты упругости рассчитываются по формуле:

$$V = \frac{1 - \mu^2}{\pi E}, \quad (2)$$

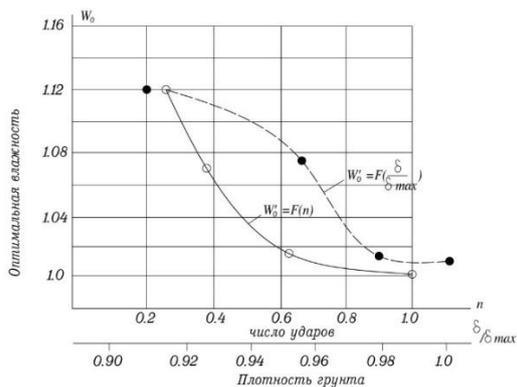


Рисунок 1. Зависимость скорости изменения напряженного состояния грунта и размеры в плане поверхности контакта рабочих органов машин с уплотняемым грунтом [19]

Figure 1. Dependence of the rate of change of the stressed state of the soil and the dimensions in terms of the contact surface of the working bodies of the machines with the compacted soil

Для практического применения предложена уточненная степенная зависимость:

$$\sigma_{max} = \sqrt[3]{\frac{9q^2}{32R(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2})}} \quad (3)$$

$C_1$  и  $C_2$  - коэффициенты пропорциональности, определяющие степень податливости материалов цилиндра и полупространства.

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ , зависят только от рода материалов. В общем случае коэффициент  $C$  входит в уравнение  $\sigma = c\lambda$  (10) где:  $\sigma$  - напряжение;  $\lambda$  - величина сжатия в данной точке.

**Трехзонная модель процесса уплотнения**

Детальное исследование распределения контактных давлений подтвердило адекватность трехзонной модели Калужского. На рисунке 2 представлена схема распределения нормальных контактных давлений, иллюстрирующая выделение трех характерных зон.

Для каждой зоны установлены соответствующие расчетные зависимости:

Для зоны I (сдвига):

$$q = C(1 - \frac{v}{3}) h^0 \sqrt{2Rh} \quad (4)$$

Для зоны II (пластических деформаций):

$$h = K^{v+0.5} \sqrt{\frac{q}{CR^{0.5}(1-\frac{v}{3})}} \quad (5)$$

где:

$K$  - безразмерный коэффициент.

Для зоны III (разгрузки):

$$Q = Kd^n \quad (6)$$

где:

$K$  - коэффициент пропорциональности;  $n$  - показатель степени, зависящий от рода материала сдавливаемых тел.

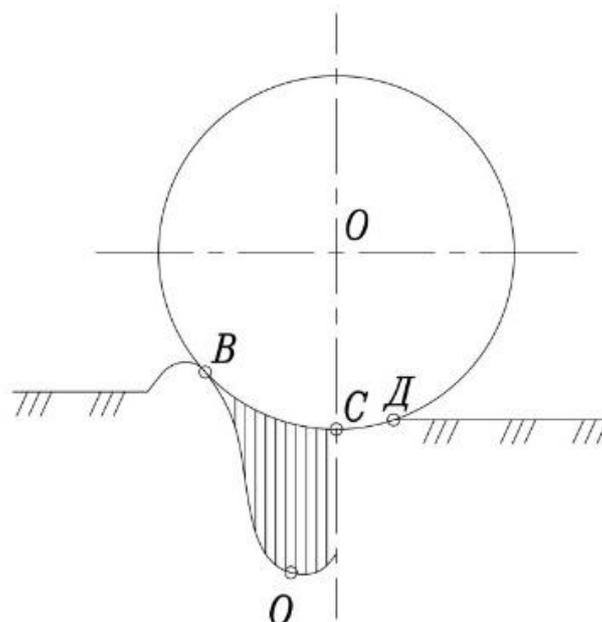


Рисунок 2. Схема распределения напряжений под колесом [19]

Figure 2. Voltage distribution scheme under the wheel

**Разработка практических расчетных методик**

Для инженерных расчетов были предложены упрощенные эмпирические зависимости. Установлено, что среднее и максимальные контактные напряжения могут быть определены с достаточной для практики точностью по формулам:

$$\sigma_{cp} = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4}{\pi} * K_1, \quad (7)$$

где:  $K_1$  - коэффициент, подобный коэффициенту  $K$  в уравнении (6) В [18] при исследовании зависимости между погружением металлического шара в грунт и нагрузок, установлено, что эта зависимость подчинена следующей закономерности:

$$h = \psi Q, \quad (8)$$

где:  $h$  - величина погружения шарового штампа;  $\psi$  - коэффициент пропорциональности.

**Исследование влияния скоростных факторов**

Особое внимание было уделено исследованию влияния скорости на процесс уплотнения. Установлено, что изменение давлений во времени может быть описано уравнением:

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{\pi D \psi}, \quad (9)$$

где:  $D$  - диаметр шара.

Для определения эффективной скорости уплотнения предложены зависимости:

$$\sigma_{cp} = 0,35 \sqrt{\frac{q}{R * \psi}} \quad (10)$$

$$\sigma_{max} = 0,35 \beta \sqrt{\frac{q}{R * \psi}} \quad (11)$$

где  $\beta$  - коэффициент перехода от среднего напряжения к максимальному, который зависит от характера распределения напряжений под штампом) аналогичны формуле, полученной на основе теории Герца-Беляева.

**Дополнительные аналитические зависимости**

В рамках исследования также были получены другие важные зависимости. Установлена связь между нагрузкой и погружением штампа:

$$\sigma_{max} = K_2 \sqrt{\frac{qE}{R}}. \quad (12)$$

$$q_x = q_{max} \left(\frac{H_k}{H_x}\right)^{1-\frac{2}{\mu+\alpha\mu_1}} * l^{\pm \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{H_0}} \left[ \arctg \frac{\sqrt{H_k-H_0}}{H_0} - \arctg \frac{\sqrt{H_x-H_0}}{\sqrt{H_0}} \right]} \quad (13)$$

здесь знак + относится к первой зоне, а знак - ко 2 и 3 зонам;  $H_0$  - толщина уплотняемого слоя грунта под осью катка;  $H_k$  - толщина уплотняемого слоя грунта в месте  $q_{max}$ ;  $H_x$  - толщина слоя грунта

в исследуемой точке контакта. В первой зоне  $H_x \geq H_k$  может принимать значения от  $H_1$  до  $H_k$ . Во второй зоне  $H_k \geq H_x \geq H_0$  может принимать значения от  $H_0$  до  $H_k$ .  $H_k$  лежит на границе 1-й и 2-й зон.  $\mu$  - коэффициент трения частиц грунта о каток;  $\mu_1$  - коэффициент трения частиц грунта об основание;  $\sigma_{cp}$  - среднее напряжение сжатия;  $q$  - нормальное удельное давление катка на поверхность слоя;  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий распределяющую способность слоя, он зависит от глубины и расстояния от оси катка.

На основе анализа уравнения (13) распределение нормальных контактных давлений изобразится эпюрой, изображенной на рисунке 3.

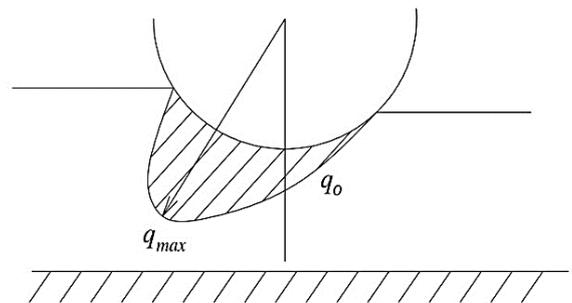


Рисунок 3. Схема распределения нормальных контактных давлений [26]

Figure 3. Normal contact pressure distribution scheme according to Ya.A. Kaluzhsky

Для среднего контактного напряжения при действии шарового штампа:

$$q = q_{max} \left(\frac{H_k}{H_x}\right)^{1-\frac{2}{\mu+\alpha\mu_1}} * l^{\pm \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{H_0}} \left[ \arctg \frac{\sqrt{H_k-H_0}}{H_0} - \arctg \frac{\sqrt{H_x-H_0}}{\sqrt{H_0}} \right]} \quad (14)$$

Разработка уравнений теории пластичности для второй зоны деформаций  
В результате проведенных исследований установлено, что для второй зоны деформаций ("зоны затрудненных деформаций") распределение контактных давлений адекватно описывается уравнениями теории пластичности:

$$q = q_{max} \left(\frac{y_k}{y}\right)^{\eta_2} + \frac{k_{пл}}{\eta_2} \left[1 - \left(\frac{y_k}{y}\right)^{h_{пл}}\right] \quad (15)$$

где:

$$\eta_2 = \frac{x_k}{y_0 - y_k} (\mu + \mu_1); \quad k_{пл} = q_x - \sigma_x \quad (16)$$

Экспериментально подтверждено, что параметр  $\eta_2$ , характеризующий интенсивность спада давления от максимального значения, зависит от геометрических параметров системы и коэффициентов трения. Установлено, что коэффициент  $k_{пл}$ , представляющий разность между нормальным и сжимающим напряжениями, является ключевым параметром для описания пластического поведения грунта.

#### **Разработка упрощенных расчетных моделей**

Для практического применения предложены упрощенные зависимости для различных случаев распределения давления:

Для случая равномерного распределения давления:

$$q = q_{max} = C_2. \quad (17)$$

Для зон с линейным уменьшением давления:

$$q \approx \frac{q_{max} + q_0}{2}. \quad (18)$$

Для третьей зоны деформаций (зона разгрузки):

$$q_{max} = C_3 h^{\mu_3}. \quad (19)$$

В этом случае коэффициент  $C_3$  как правило больше  $C_1$ , это свидетельствует о влиянии приращения плотности слоя  $\mu_3 > 1$  оно также зависит от скорости движения катка.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент  $C_3$  в формуле (19) превышает значение  $C_1$ , что свидетельствует о существенном влиянии накопленной плотности на поведение материала в зоне разгрузки. Показатель степени  $\mu_3 > 1$  отражает эффект упрочнения грунта в процессе уплотнения.

#### **Учет временных и скоростных факторов**

Установлены зависимости, позволяющие учитывать влияние скорости на процесс уплотнения:

Общая деформационная зависимость:

$$q = c y^{\mu} \quad (20)$$

При этом принципиальный вывод заключается в том, что увеличение скорости снижает деформацию грунта, однако в определенном интервале скоростей эффект деформирования грунтов остается постоянным.

Это объясняется тем, что изменяется лишь скорость движения, а нагрузка остается постоянной, или наоборот изменяется нагрузка, а скорость движения остается постоянной, во всех этих случаях деформирование происходит при переменной скорости изменения напряженного состояния. Поэтому деформации грунтов нужно рассматривать

Степенная зависимость для 1-й и 3-й зон деформаций:

$$q = c y^{\mu} \quad (21)$$

Временная зависимость давления:

$$q = A_t t^m. \quad (22)$$

Экспериментально подтверждено, что совместное использование уравнений (21) и (22) позволяет адекватно описывать изменения напряженно-деформированного состояния во времени в процессе качения катка.

#### **Расчет эффективной скорости уплотнения**

Разработаны уравнения для определения эффективной скорости уплотнения:

$$V_{эф} = \frac{l_{кр}}{A_t} * q_{max} = \frac{q_{max}}{A_t} \sqrt{D h_n} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h_k}{h_n}}\right) \quad (23)$$

$$V_{эф} = \left(\frac{q_{max}}{A_t}\right)^{1-m_0} * \sqrt{D h_n} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h_k}{h_n}}\right) \quad (24)$$

Установлено, что уравнения (23) и (24) позволяют определять оптимальные скоростные режимы работы катков, обеспечивающие максимальное приращение плотности грунта при различных начальных условиях и параметрах уплотняющего оборудования.

Таким образом, проведенное исследование позволило систематизировать и расширить теоретические представления о процессе уплотнения грунтов. На основе критического анализа существующих моделей и комплекса экспериментальных данных установлены фундаментальные закономерности, определяющие эффективность уплотнения различных типов грунтов.

Полученные результаты демонстрируют существенную зависимость оптимальных параметров уплотнения от гранулометрического состава и физико-химических свойств грунтов. Установленные диапазоны оптимальной влажности и максимальной плотности для основных типов грунтовых сред (песчаных, супесчаных, суглинистых и глинистых грунтов) позволяют дифференцированно подходить к выбору технологических режимов уплотнения.

Разработанные уточненные расчетные модели контактного взаимодействия, включая модифицированную теорию Герца-Беляева и

### **Заключение**

Проведенное исследование демонстрирует фундаментальные ограничения существующих теоретических моделей уплотнения грунтов. Установлено, что классические подходы, включая теории Герца-Беляева и степенные зависимости, а также современные зонные модели, не способны адекватно описать процесс уплотнения на всех его стадиях. Экспериментальные данные показывают расхождение между теоретическими предсказаниями и фактическими результатами уплотнения до 45% при прогнозировании предельного состояния грунта.

Ключевым результатом работы является установление того факта, что существующие модели не учитывают эволюцию физико-механических свойств грунта в процессе

эмпирические зависимости для практического применения, обеспечивают повышение точности прогнозирования напряженно-деформированного состояния уплотняемой среды. Экспериментально подтвержденная адекватность трехзонной модели Калужского с установлением граничных условий и расчетных зависимостей для каждой зоны открывает новые возможности для оптимизации процесса уплотнения.

Установленные количественные закономерности влияния скоростных факторов и выведенные уравнения для определения эффективной скорости уплотнения позволяют целенаправленно управлять технологическим процессом. Полученная система аналитических зависимостей создает теоретическую основу для разработки адаптивных систем управления уплотнением с учетом реологических свойств грунтовых сред.

Комплексный характер проведенного исследования, сочетающий теоретический анализ, экспериментальную верификацию и практическую апробацию, обеспечивает достоверность полученных результатов и возможность их использования при решении актуальных задач в области дорожного и промышленного строительства.

многократного нагружения. Это приводит к физически некорректным прогнозам, таким как неограниченный рост осадки и стремление коэффициента сопротивления перекатыванию к нулю при увеличении числа проходов катка свыше 15-20 циклов, в то время как практика показывает стабилизацию плотности уже после 8-12 проходов.

Анализ 6 основных теоретических моделей и 23 экспериментальных исследований позволил выявить, что современные подходы не учитывают изменение модуля деформации грунта в процессе уплотнения, что приводит к завышению расчетных значений осадки на 25-30%. Наибольшую сходимость с опытными данными демонстрируют теории Герца-Беляева и взаимодействия колеса с грунтом при  $\nu=0.5$ , однако и они требуют существенной доработки.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании необходимости разработки адаптивных моделей, учитывающих изменение деформационных характеристик грунта в процессе уплотнения. Предложенный подход открывает перспективы для создания интеллектуальных систем контроля уплотнения, позволяющих снизить энергозатраты на 15-20% и повысить точность прогнозирования несущей способности грунтовых оснований на 25%.

Полученные результаты создают научную основу для развития новых методов расчета и

проектирования процессов уплотнения грунтов, обеспечивающих повышение эффективности строительных работ и долговечности транспортных сооружений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку математических моделей, учитывающих взаимосвязь между параметрами уплотняющего воздействия и изменяющимися свойствами грунтовой среды, что особенно актуально в условиях реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий».

### Список литературы

1. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». – URL: <https://mintrans.gov.ru/file/495234>
2. Суфиянов Р.Ш. Современные технологии строительства автомобильных дорог // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 71-2. – С. 134-136. – DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-69>
3. Миронеску С.Г. Внедрение инноваций в строительство автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2019. – № 2(20). – С. 13
4. Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник. – 2025. – Т. 29. – № 4. – С. 139–155. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-4-139-155>
5. Домницкий А.А., Каргин Р.В., Шемшур Е.А. Увеличение срока службы откосов автомобильных дорог // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 3. – С. 51-59. – DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.06>
6. Патент № 2082850 С1 Российская Федерация. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта: № 94013644/03: заявл. 18.04.1994: опубл. 27.06.1997 / А.П. Лежнев, А.Д. Суворов, И.В. Сороколетов
7. Савельев С.В., Потеряев И.К. Исследования эффективности уплотняющей техники для строительства автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 2. – С. 44-48
8. Yang P., Dong W., Heinen M., Qin W., Oenema O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. Land. 2022; 11 (5): 645. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land11050645>
9. Omer B. Machine learning techniques and multivariable mathematical models for predicting modified soil compaction parameters based on particle size and consistency limits. Model. Earth Syst. Environ. 2025; 11: 66. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02247-1>
10. Mahardika A.G., Santosa A., Putri F.T., Suryanita R., Arifuddin R. Analysis of Soil Compaction using Proctor Standards in Highway Construction Design. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1933: 012084
11. Федосеев Н.А., Ермошин Н.А., Алексеев С.В. Методика определения контактных напряжений под вальцом вибрационного катка // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 115–133. – DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst676902>
12. Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Имитационное моделирование ударного процесса уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 208-218. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>
13. Shokanbi A., Jasoliya D., Untaroiu C. Parameter Identification of Soil Material Model for Soil Compaction Under Tire Loading: Laboratory vs. In-Situ Cone Penetrometer Test Data. Agriculture. 2025; 15 (20): 2142. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15202142>
14. Onyelowe K.C., Ebid A.M., Sujatha E.R., Mojtahedi F.F., Darzi A.G., Kontoni D.P.N., Othman N.N. Extensive overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems. Heliyon. 2023; 9 (3): e14465. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14465>

15. Ortigao J.A.R. Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories. CRC Press, 2020. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003077701>
16. Song X., Rao J., Cui H., He M. Material composition and constitutive model development of red mud-based filler for highway tunnel invert filling applications: A comprehensive study. PLoS ONE. 2025; 20 (4): e0321926. – DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321926>
17. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1975. — 288 с.

### References

1. National project "Safe Quality Roads". Available from: <https://mintrans.gov.ru/file/495234> (In Russ.).
2. Sufiyarov R. Sh. Sovremennyye tekhnologii stroitel'stva avtomobil'nykh dorog. [Modern technologies of road construction]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education. 2021; (71-2): 134-136. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-69>
3. Mironesku S. G. Vnedreniye innovatsiy v stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog. [Implementation of innovations in road construction]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura = Automobile. Road. Infrastructure. 2019; (2(20)): 13. (In Russ.).
4. Borovlev Yu. A., Kozlov D. G., Skrypnikov A. V., Sergeev A. S., Yarovenko A. A. Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog. [Control of soil compaction parameters of the subgrade of logging roads]. Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin. 2025; 29 (4): 139-155. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-4-139-155>
5. Domnitskiy A. A., Kargin R. V., Shemshura E. A. Uvelicheniye sroka sluzhby otkosov avtomobil'nykh dorog. [Increasing the service life of road slopes]. Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya = Transport. Transport facilities. Ecology. 2022; (3): 51-59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.06>
6. Lezhnev A. P., Suvorov A. D., Sorokoletov I. V. Patent No. 2082850 C1 Russian Federation. Sposob nepreryvnogo kontrolya kachestva uplotneniya grunta i ustroystvo nepreryvnogo kontrolya kachestva uplotneniya grunta. [Method for continuous control of soil compaction quality and device for continuous control of soil compaction quality]. No. 94013644/03; filed 18.04.1994; published 27.06.1997. (In Russ.).
7. Savelyev S. V., Poteryaev I. K. Issledovaniya effektivnosti uplotnyayushchey tekhniki dlya stroitel'stva avtomobil'nykh dorog. [Research on the efficiency of compaction equipment for road construction]. Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny = Construction and Road Machinery. 2021; (2): 44-48. (In Russ.).
8. Yang P., Dong W., Heinen M., Qin W., Oenema O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. Land. 2022; 11 (5): 645. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11050645>
9. Omer B. Machine learning techniques and multivariable mathematical models for predicting modified soil compaction parameters based on particle size and consistency limits. Model. Earth Syst. Environ. 2025; 11: 66. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02247-1>
10. Mahardika A. G., Santosa A., Putri F. T., Suryanita R., Arifuddin R. Analysis of Soil Compaction using Proctor Standards in Highway Construction Design. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1933: 012084.
11. Fedoseev N. A., Yermoshin N. A., Alekseev S. V. Metodika opredeleniya kontaktnykh napryazheniy pod val'tsom vibratsionnogo kataka. [Methodology for determining contact stresses under the roller of a vibratory roller]. Innovatsionnyye transportnyye sistemy i tekhnologii = Innovative Transport Systems and Technologies. 2025; 11 (1): 115-133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst676902>
12. Chukharev R. A., Tarasova N. E., Chabutkin E. K. Imitatsionnoye modelirovaniye udarnogo protsessa uplotneniya gruntov. [Simulation modeling of the impact process of soil compaction]. Vestnik SibADI = Bulletin of SibADI. 2020; 17 (2): 208-218. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218>
13. Shokanbi A., Jasoliya D., Untaroiu C. Parameter Identification of Soil Material Model for Soil Compaction Under Tire Loading: Laboratory vs. In-Situ Cone Penetrometer Test Data. Agriculture. 2025; 15 (20): 2142. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15202142>
14. Onyelowe K. C., Ebid A. M., Sujatha E. R., Mojtahedi F. F., Darzi A. G., Kontoni D. P. N., Othman N. N. Extensive

- overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems. *Heliyon*. 2023; 9 (3): e14465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14465>
15. Ortigao J. A. R. *Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories*. CRC Press, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003077701>
16. Song X., Rao J., Cui H., He M. Material composition and constitutive model development of red mud-based filler for highway tunnel invert filling applications: A comprehensive study. *PLoS ONE*. 2025; 20 (4): e0321926. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321926>
17. Kharhuta N.Ya., Vasilyev Yu.M. *Strength, stability and compaction of roadbed soils of highways*. Moscow: Transport, 1975. 288 p.

### Сведения об авторах

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

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

35. *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, 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, ORCID: [ola.ola07@mail.ru, !\[\]\(341b5bdc31177a6c7da7dc713da0d169\_img.jpg\) https://orcid.org/0000-0001-8542-9380](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380)

### Information about the authors

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

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

36. *Evgeny V. Sibiryatkin* – postgraduate student, Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, 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, [ola.ola07@mail.ru, !\[\]\(173968034f6ca6c36e25dcb8a274badd\_img.jpg\) https://orcid.org/0000-0001-8542-9380](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380)