

Научная статья
УДК 625.08:624.131
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>
EDN: OJIOLE



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРОВАЛЬЦА С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ГРУНТОМ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЛОЁВ АВТОДОРОГИ

С.В. Савельев, И.К. Потеряев ✉, Г.Г. Бурый

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
ilya_poter@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена моделированию процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоев автодороги. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества и долговечности земляного полотна автомобильных и железно-дорожных дорог, что напрямую зависит от эффективности уплотнения грунтов.

Методы и материалы. Приводятся исследования с помощью метода математического моделирования колебательной системы «вибровалец катка – деформируемая среда». Система включает в себя взаимодействующие между собой элементы, обладающие жесткими и вязкими свойствами. Эти свойства соответствуют реологическим характеристикам рабочего органа катка и деформируемой им среды. Модель основана на системе дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих взаимодействие масс вибровальца и грунтовой среды с учетом их упруго-пластических и вязкостных свойств.

Результаты. Представлены впервые полученные зависимости коэффициента вязкого трения и жесткости деформируемого грунта от влияния внешней деформирующей силы. На основе этих данных решается система дифференциальных уравнений движения колеблющихся масс, позволяющая определить средние значения виброускорений в объеме уплотняемого грунта. Впервые предложена функциональная зависимость, уточняющая массу активно деформируемого грунта в зависимости от параметров вибрации, геометрических характеристик вальца и типа грунта.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования рациональной частоты колебаний вибровозбудителя и других режимных параметров дорожных катков, что способствует повышению эффективности транспортного строительства. Усовершенствованная математическая модель взаимодействия вибровальца катка с деформируемым грунтом даёт возможность определить величины виброускорений частиц деформируемого грунта. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности дорожно-строительной техники, в частности при проектировании дорожных катков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каток, уплотнение, грунт, вибровалец, коэффициент уплотнения, автомобильная дорога, жесткость, вибровозбудитель, виброускорение, уплотнение

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; одобрена после рецензирования 27.04.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г. Моделирование процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоёв автодороги // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 524-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

© Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

EDN: OJILOE

MODELING THE PROCESS OF INTERACTION BETWEEN VIBRATORY ROLLER AND DEFORMABLE SOIL DURING COMPACTION OF ROAD TECHNOLOGICAL LAYERS

S.V. Savelyev, I.K. Poteyaev ✉, G.G. Buryi

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
ilya_poter@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to modeling the process of interaction between a vibratory roller and deformable soil during compaction of technological layers of a highway. The relevance of the study is determined by the need to improve the quality and durability of the earth bed of roads and railroads, which directly depends on the efficiency of soil compaction.

Methods and Materials. The research using the method of mathematical modeling of the oscillating system “roller vibration roller - deformable medium” is presented. The system includes interacting elements possessing rigid and viscous properties. These properties correspond to the rheological characteristics of the working body of the roller and the medium deformed by it. The model is based on the system of second-order differential equations describing the interaction between the masses of the vibratory roller and the ground medium taking into account their elastic-plastic and viscous properties.

Results. For the first time relations between viscous friction coefficient and stiffness of deformed soil on the influence of external deforming force have been presented. On the basis of these data the system of differential equations of motion of oscillating masses has been considered, which allows determining average values of vibration accelerations in the volume of compacted soil. A functional dependence specifying the mass of actively deformed soil depending on vibration parameters, geometric characteristics of the roller and soil type has been proposed for the first time.

Discussion and conclusion. The obtained results can be used to substantiate the rational frequency of vibration exciter vibrations and other mode parameters of road rollers, which helps to improve the efficiency of transportation construction. The improved mathematical model of interaction between the roller's vibrating roller blade and deformed soil makes it possible to determine the values of vibration accelerations of particles of deformed soil. The results of the study can be used to improve the efficiency of road-building machinery, in particular, in the design of road rollers.

KEYWORDS: roller, compaction, soil, vibratory drum, compaction coefficient, road, rigidity, vibration exciter, vibration acceleration, compaction

The article was submitted: March 19, 2025; approved after reviewing: April 27, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Savelyev S.V., Poteyaev I.K., Buryi G.G. Modeling the process of interaction between vibratory roller and deformable soil during compaction of road technological layers. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 524-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

© Savelyev S.V., Poteyaev I.K., Buryi G.G., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие дорожно-транспортной инфраструктуры в современных условиях требует постоянного повышения качества и долговечности инженерных сооружений, среди которых ключевую роль играют земляное полотно автомобильных дорог и другие насыпи инженерного назначения. Надежность и устойчивость этих элементов дорожной сети напрямую связаны с качеством уплотнения грунтов. Этот фактор оказывает значительное влияние на прочность, стабильность и срок службы не только самого земляного полотна, но и возводимых на нем инженерных сооружений.

Актуальность развития дорожно-транспортной инфраструктуры требует повышения интенсивности строительства и обеспечения качества всех технологических слоёв автомобильной дороги и слоёв земляного полотна в частности. Повышение эксплуатационных характеристик этих сложных инженерных сооружений зависит от качества уплотнения грунтов земляного полотна, которое является ответственным основанием для всех верхних слоёв автодороги. Данный фактор непосредственно влияет на устойчивость, работоспособность и долговечность основания дороги – земляного полотна и верхних технологических слоёв: щебёночных оснований и дорожного полотна. Причём вышесказанное относится не только к автодорогам, но и к железнодорожным и другим грунтовым насыпям инженерных сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований будем использовать метод математического моделирования и программные инструменты – программные продукты Microsoft Excel, Mat Cad. Методы математического моделирования физических процессов подразумевают принятия ряда определённых допущений, в нашем случае рассмотрим:

- масса вальца m_2 , включает не только массу самого вальца, но и часть массы катка и рамы, приходящиеся на него;
- деформируемый грунт принимается сплошной упруговязкопластичной средой, с которой валец активно взаимодействует по всей толщине уплотняемого слоя;
- валец не отрывается от поверхности грунта (режим вибротрамбования не рассматривается);
- основание, на котором расположен уплотняемый слой грунта, считается абсолютно жестким;
- рассматривается система с сосредоточенными параметрами.

Рабочий орган вибрационного катка, взаимодействующий с деформируемым грунтом, – это сложная колебательная система, требующая определенного описания для происходящих в ней процессов. В приведенных исследованиях она представляет собой два колеблющихся массивных элемента, связанных между собой элементами вязкости и жесткости^{1,2,3}, характеризующими реологические свойства рабочего органа катка и деформируемой грунтовой среды (рисунок) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

¹ Fratta D., Kim K.-S. Effective Depth of Soil Compaction in Relation to Applied Compactive Energy. University of Wisconsin – Madison, WisDOT ID no. 0092–08–11 February 2015.

² Kopf F., Paulmichl I., Adam D. Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground // From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, June 2–4. – 2010.

³ Головин О.В. Вибрационные машины // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. С. 48–52

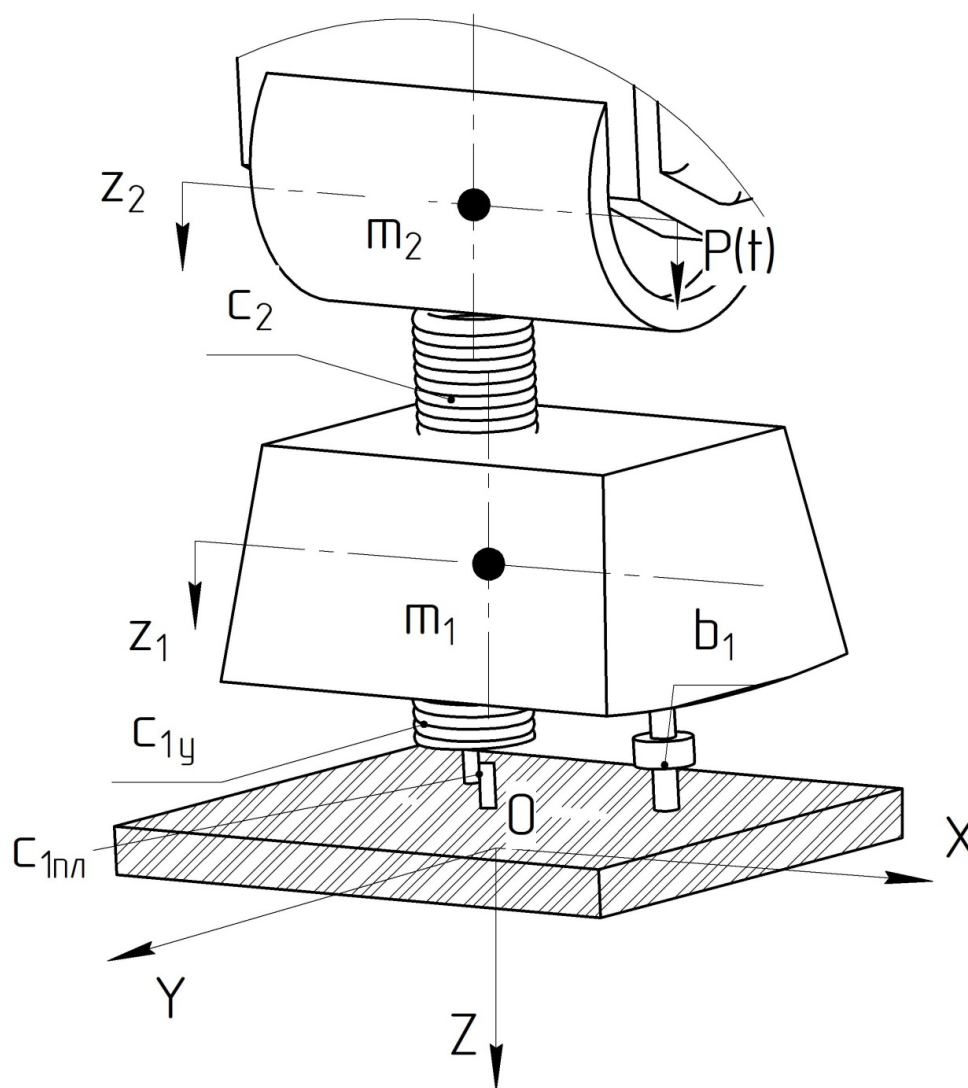


Рисунок – Колебательная система «вибровалец катка – деформируемая среда»
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Model of the oscillatory system «roller vibratory drum – deformable soil»
Source: compiled by the authors.

На рисунке b_1 – коэффициент, характеризующий вязкость грунтовой среды, Н·с/м; c_2 – коэффициент, характеризующий жесткость рабочего органа; c_{1y} и $c_{1пл}$ – коэффициенты, характеризующие упруго-пластичные деформации среды, Н/м; m_2 – масса, приходящаяся на рабочий орган катка; m_1 – масса деформируемой грунтовой среды; P – периодическая сила от вибровозбудителя вальца, Н; z_1 и z_2 – относительное смещение колеблющихся масс, соответственно.

Определение коэффициента, характеризующего упруго-пластичные свойства грунтовой среды

$$c_1 = \frac{c_{1y} \cdot c_{1пл}}{c_{1y} + c_{1пл}} = \frac{E_y \cdot E_{пл}}{E_y + E_{пл}} \cdot \frac{S}{h}, \quad (1)$$

где $E_{пл}$ – модуль пластических деформаций грунта, МПа; E_y – модуль упругой деформации грунта, МПа; S – площадь отпечатка контакта вибровальца на грунте, м²; h – толщина слоя деформируемого грунта, м.

Величину коэффициента, характеризующего вязкость грунта b_1 , можно определить как

$$b_1 = \eta \cdot \frac{S}{h}, \quad (2)$$

где η – показатель динамической вязкости грунта, П.

Разработанный модельный подход опирается на теоретические исследования в области математического и физического моделирования процесса уплотнения таких учёных, как О.А. Савинова, М. Новака, Д.Д. Баркана, О.Я. Шехтера, описывающих взаимодействие колеблющихся масс дифференциальными уравнениями второго порядка [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]:

$$\begin{cases} m_2 a_2 + c_2 (z_2 - z_1) = P \cos \omega t + m_2 g; \\ m_1 a_1 + b_1 \dot{z}_1 + c_1 z_1 + c_2 (z_1 - z_2) = m_1 g, \end{cases} \quad (3)$$

где m_i – взаимодействующие массы колебательной системы, кг; ω – частота угловых колебаний вибровозбудителя, рад/с; t – время контакта вальца с грунтом, с; c_1 – коэффициенты, характеризующие упруго-пластичные деформации грунтовой среды, Н/м; c_2 – коэффициент, характеризующий жесткость вибровальца, Н/м [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Определим вынуждающую силу вибровозбудителя P :

$$P = m_d r_d \cdot \omega^2, \quad (4)$$

где $m_d r_d$ – дебалансный момент вибровозбудителя, кг·м.

Определим угловую частоту колебаний ω :

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (5)$$

где f – частота колебаний вибровозбудителя, Гц.

Новой доработкой существующих математических моделей, описывающих подобные колебательные процессы, является введение в модель функциональной зависимости (6), которая учитывает изменение массы активно деформируемого грунта от текущего момента процесса уплотнения, массо-геометрических характеристик вальца и параметров вибрации, что является оригинальным фактором, уточняющим достоверность и точность результатов при использовании представленной матмодели:

$$m_1 = f(f, P, B, R, m_2, K_y, \text{тип грунта}), \quad (6)$$

где P – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н; f – частота колебаний вибровозбудителя,

Гц; B – ширина вибровальца, м; R – радиус вибровальца, м; m_2 – масса, приходящаяся на вибрационный рабочий орган катка, кг; K_y – коэффициент, характеризующий степень уплотнения грунта.

Новую, впервые полученную зависимость для определения массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации получили в виде

$$m_1 = \rho \cdot \left(\frac{1}{3} h \cdot ((B + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (d + 2h \cdot \operatorname{tg} \beta) + \sqrt{d \cdot B \cdot (B + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (d + 2h \cdot \operatorname{tg} \beta)} + d \cdot B) \right), \quad (7)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; h – толщина уплотняемого слоя грунта в зоне активного действия вибрации, м; α и β – углы распространения зоны активного действия вибрации от пятна контакта, град; B – ширина вальца, м; d – длина дуги пятна контакта вальца с грунтом, м.

Углы распространения зоны активного действия вибрации составили при уплотнении связного грунта: $\alpha=5^\circ$, $\beta=14^\circ$; несвязного грунта: $\alpha=8^\circ$, $\beta=18^\circ$.

Общим решением для данной системы дифференциальных уравнений будет сумма для частного решения уравнений колебательной системы и общего решения однородных уравнений. Общее решение характеризуется слагаемым, которое соответствует свободным колебаниям системы с собственной. Второе слагаемое характеризуется вынужденными колебаниями масс системы с частотой вынуждающей силы вибровозбудителя [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

$z_1 = z_1(t)$, $z_2 = z_2(t)$, $t \in (0, T)$, где T – период.

Данные решения системы в полной мере удовлетворяют исходным данным

$$z_1(0)=0, \quad \dot{z}_1(0) = 0; \quad (8)$$

$$z_2(0)=0, \quad \dot{z}_2(0) = 0. \quad (9)$$

При средних значениях параметров системы решим задачу Коши [36, 37, 38].

Сложим почленно все уравнения системы (3) и выразим их как $a_2(t)$, через $z_1(t)$ определим производные этой функции.

$$m_2(a_2 - g) + m_1(a_1 - g) + b_1 \dot{z}_1 + c_1 z_1 = P \cos \omega t; \quad (10)$$

$$m_2(a_2 - g) = -m_1(a_1 - g) - b_1 \dot{z}_1 - c_1 z_1 + P \cos \omega t; \quad (11)$$

$$m_2 a_2 = -m_1 a_1 - b_1 \dot{z}_1 - c_1 z_1 + P \cos \omega t + m_2 g + m_1 g; \quad (12)$$

$$a_2 = -\frac{m_1}{m_2} a_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{c_1}{m_2} z_1 + \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g. \quad (13)$$

Определим $\ddot{z}_2$.

$$\ddot{z}_2 = -\frac{m_1}{m_2} \ddot{z}_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{a}_1 - \frac{c_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{P}{m_2} \omega \sin \omega t. \quad (14)$$

Произведя дифференцирование второго уравнения системы (3) дважды, получим

$$m_1 \ddot{z}_1 + b_1 \ddot{z}_1 + c_1 a_1 + c_2 (a_1 - a_2) = 0. \quad (15)$$

Проведём преобразованиеданного выраженияпри помощи равенств (13), (15) в дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно функции $z_1(t)$:

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 - \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_2 = 0; \quad (16)$$

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 - \left(\frac{c_2}{m_1} \right) \cdot \left(-\frac{m_1}{m_2} a_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{c_1}{m_2} z_1 + \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g \right) = 0; \quad (17)$$

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 + \frac{c_2}{m_2} a_1 + \frac{c_2}{m_1} \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 + \frac{c_2}{m_1} \frac{c_1}{m_2} z_1 - \frac{c_2}{m_1} \frac{P \cos \omega t}{m_2} - \frac{c_2}{m_1} \frac{m_1 + m_2}{m_2} g = 0; \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& \overset{\text{IV}}{z_1} + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \overset{\bullet\bullet\bullet}{z_1} + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \dot{a}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \dot{z_1} + \\
& + \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} z_1 = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g.
\end{aligned} \quad (19)$$

Преобразуем полученные уравнения в соответствии с теоремой о структуре решения дифференциальных уравнений, имеющих специальный вид правой части [36, 37]:

$$z_1(t) = z_1^0(t) + z_1^*(t), \quad (20)$$

где $z_1^0(t)$ – общее решение для однородного дифференциального уравнения, соответствующего (18), а $z_1^*(t)$ – это его частное решение (19).

Выявим $z_1^0(t)$ однородного дифференциального уравнения

$$\overset{\text{IV}}{z_1} + \bar{A} \overset{\bullet\bullet\bullet}{z_1} + \bar{B} \dot{a}_1 + \bar{C} \dot{z_1} + \bar{D} z_1 = 0 \quad (21)$$

представим характеристическое уравнение

$$F(e) = e^4 + \bar{A} e^3 + \bar{B} e^2 + \bar{C} e + \bar{D} = 0; \quad (22)$$

$$\bar{A} = \frac{b_1}{m_1}; \quad (23)$$

$$\bar{B} = \frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1}; \quad (24)$$

$$\bar{C} = \frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2}; \quad (25)$$

$$\bar{D} = \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2}. \quad (26)$$

Известно, что многочлен четвертой степени $e^4 + \bar{A} e^3 + \bar{B} e^2 + \bar{C} e + \bar{D}$ имеет два комплексных сопряженных и два действительных различных корня [36, 37].

В равносильном виде представим уравнение (21)

$$e = f(e) = -\frac{\bar{D}}{\bar{C}} - \frac{1}{\bar{C}} e^4 - \frac{\bar{A}}{\bar{C}} e^3 - \frac{\bar{B}}{\bar{C}} e^2. \quad (27)$$

Используем метод итераций, где в качестве первого приближения корня примем

$$e_1^{(1)} = -\frac{\bar{D}}{\bar{C}}. \quad (28)$$

Вычисляем дальнейшие приближения

$$e_1^{(n)} = f(e_1^{(n-1)}). \quad (29)$$

Известно [29], если функция $f(e)$ определяется и дифференцируется на определённом отрезке $[\bar{a}, \bar{b}]$ и $|f'(e)| < 1$ при $\bar{a} < e < \bar{b}$, тогда процесс итерации $e_1^{(n)} = f(e_1^{(n-1)})$, $n=1,2,\dots$ сходится независимо от исходного значения $e_1^{(1)} \in [\bar{a}, \bar{b}]$, а предельное значение $e_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} e_1^{(n)}$ будет являться единственным корнем уравнения $e = f(e)$ на определённом отрезке $[\bar{a}, \bar{b}]$ [36, 37].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Найдено частное решение уравнения (21), т.к. уточнение корней не имеет особого практического значения, при $e_1 = e_1^{(1)} + p$ получим

$$z_1^{(1)}(t) = u^{e_1 t} = u^{(e_1^{(1)} + p)t} = u^{e_1^{(1)} t} \cdot u^{pt} = u^{e_1^{(1)} t}, \quad (30)$$

где p – стремится к бесконечности.

Правая часть выражения (22) разлагается по методу Тейлора в экстремуме точки $e_1^{(1)}$. Запишем более удобную форму уравнения:

$$F(e) = F(e_1^{(1)}) + \frac{F'(e_1^{(1)})}{1}(e - e_1^{(1)}) + \frac{F''(e_1^{(1)})}{2!}(e - e_1^{(1)})^2 + \\ + \frac{F'''(e_1^{(1)})}{3!}(e - e_1^{(1)})^3 + \frac{F^{IV}(e_1^{(1)})}{4!}(e - e_1^{(1)})^4 = 0. \quad (31)$$

Представив $F(e_1^{(1)}) \approx 0$, разделив (31) на $e - e_1^{(1)}$ выявленный многочлен, получим выражение

$$\hat{f}(e) = e^3 + \tilde{A}e^2 + \tilde{B}e + \tilde{C} = 0, \quad (32)$$

где $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ – выявленные коэффициенты полученного многочлена, приведённые к стандартному виду.

Изучим ситуацию, когда многочлен имеет лишь один действительный и два сопряженных комплексных корня [36].

Рассмотрим корни полученного уравнения

$$\begin{cases} e_2 + e_3 + e_4 = -\tilde{A}; \\ e_2(e_3 + e_4) + e_3e_4 = \tilde{B}; \\ e_2 \cdot e_3 \cdot e_4 = -\tilde{C}. \end{cases} \quad (33)$$

и значения корней $e_2, e_{3,4} = j_1 \pm i \cdot j_2$.

Запишем общее решение уравнения (20) с учётом всех преобразований:

$$z_1^0(t) = U_1 u^{e_1 t} + U_2 u^{e_2 t} + U_3 u^{j_1 t} \cos(j_2 \cdot t) + U_4 u^{j_1 t} \sin(j_2 \cdot t). \quad (34)$$

Рассмотрим частное решение $z_1^*(t)$ для правой части уравнения (20).

$$\begin{aligned} & {}^{IV} z_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{\ddot{z}}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \dot{a}_1 + \\ & + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \dot{z}_1 + \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} z_1 = \\ & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g; \end{aligned} \quad (35)$$

$$z_1^*(t) = M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L}. \quad (36)$$

Получены производные $z_1^*(t)$.

$$\dot{z}_1^*(t) = -M \omega \sin \omega t + N \omega \cos \omega t; \quad (37)$$

$$a_1^*(t) = -M \omega^2 \cos \omega t - N \omega^2 \sin \omega t; \quad (38)$$

$$\ddot{\ddot{z}}_1^*(t) = M \omega^3 \sin \omega t - N \omega^3 \cos \omega t; \quad (39)$$

$${}^{IV} z_1^*(t) = M \omega^4 \cos \omega t + N \omega^4 \sin \omega t. \quad (40)$$

Используя выражения (37) и производные $Z_1^*(t)$ до четвертого порядка в уравнении (20), запишем

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) (-M\omega^2 \cos \omega t - N\omega^2 \sin \omega t) + \\
 & + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) (-M\omega \sin \omega t + N\omega \cos \omega t) + \\
 & + \left(\frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \left(M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L} \right) = \\
 & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g;
 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 & M\omega^4 \cos \omega t + N\omega^4 \sin \omega t + A M\omega^3 \sin \omega t - A N\omega^3 \cos \omega t - \\
 & - \bar{B} M\omega^2 \cos \omega t - \bar{B} N\omega^2 \sin \omega t - \bar{C} M\omega \sin \omega t + \\
 & + \bar{C} N\omega \cos \omega t + \bar{D} M \cos \omega t + \bar{D} N \sin \omega t + \bar{L} \bar{D} = \\
 & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g = \\
 & = \bar{\mu} \cdot \cos \omega t + \bar{\eta} \cdot \sin \omega t + \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g;
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\bar{\mu} = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2}; \tag{43}$$

$$\bar{\eta} = 0; \tag{44}$$

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}(\omega). \tag{45}$$

Сравнивая тригонометрические многочлены в исследуемых выражениях, определим

$$\bar{L} \bar{D} = \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g. \tag{46}$$

Определяем неявные коэффициенты M и N для системы двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} M(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}) + N(-\bar{A}\omega^3 + \bar{C}\omega) = \bar{\mu}; \\ M(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) + N(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}) = 0. \end{cases} \quad (47)$$

Используя метод Крамера, получаем

$$M = \frac{s_M}{s}; \quad (48)$$

$$N = \frac{s_N}{s}. \quad (49)$$

$$\begin{aligned} s &= \begin{vmatrix} \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} & -(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) \\ \bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega & \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} \end{vmatrix} = \\ &= \left(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}\right)^2 + \left(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega\right)^2 > 0; \end{aligned} \quad (50)$$

$$s_M = \begin{vmatrix} \bar{\mu} & -(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) \\ 0 & \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} \end{vmatrix} = \bar{\mu}(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}); \quad (51)$$

$$s_N = \begin{vmatrix} \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} & \bar{\mu} \\ \bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega & 0 \end{vmatrix} = -\bar{\mu}(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega). \quad (52)$$

Включим M , N , $\bar{L}$ в (52) [36].

Определим константы интегрирования с учётом начальных условий для общего решения выражения. Анализируем задачу $U_3 = U_4 = 0$.

Определим решение уравнения (20)

$$z_1(t) = U_1 u^{(1)} e^{i_1 t} + U_2 u^{(2)} e^{i_2 t} + M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L}. \quad (53)$$

Значения вибрационных ускорений массы уплотняемого грунта $a_1(t)$ и вибрационного вальца $a_2(t)$ определится дифференцированием (53) дважды:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= e_1^{(1)} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - \\ &- M \cdot \omega \cdot \sin \omega t + N \cdot \omega \cdot \cos \omega t; \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} a_1(t) &= e_1^{(1)2} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2^2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - \\ &- M \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t - N \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \quad (55)$$

Определим $a_2(t)$ по формуле

$$\begin{aligned} a_2(t) &= -\frac{m_1}{m_2} \cdot \\ &\cdot \left(e_1^{(1)2} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2^2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - M \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t - N \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \right) - \\ &- \frac{b_1}{m_2} \cdot \left(e_1^{(1)} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - M \cdot \omega \cdot \sin \omega t + N \cdot \omega \cdot \cos \omega t \right) - \\ &- \frac{c_1}{m_2} \cdot \left(U_1 u^{e_1^{(1)}t} + U_2 u^{e_2 t} + M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L} \right) + \\ &+ \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g. \end{aligned} \quad (56)$$

Окончательное решение для выявления величины виброускорений может быть найдено с использованием программных продуктов Microsoft Excel, Maple, Mathcad [39].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что собственные колебания рассматриваемой системы зависят от начальных условий и быстро затухают с течением времени, рассмотрим частное решение для системы дифференциальных уравнений при установившихся вынужденных колебаниях. Определим значение виброускорений массы деформируемой грунтовой среды [29].

В соответствии с исследованиями известных учёных Д.Д. Баркана и Н.Я. Хархуты критерий эффективности процесса вибрацион-

ного деформирования грунтовой среды—это значения величины виброускорений активной массы грунтовой среды. А общеизвестный физический закон ускорения частиц колеблющегося грунта – это вторая производная по времени от смещения частиц грунта при его деформировании и напрямую влияет на интенсивность деформирования грунтовой среды и на полученную степень уплотнения грунтовой среды.

Усовершенствованная математическая модель взаимодействия вибровальца катка с деформируемым грунтом даёт возможность определить величины виброускорений частиц деформируемого грунта. Анализ их значений позволяет выявить экстремумы этих функций при максимально интенсивном накоплении

пластических деформаций и определить условия, при которых они возникают. А условиями в нашем случае являются технологические и режимные параметры вибрационных катков, при которых они показывают максимальную производительность и эффективность.

Экстремумы функций значений виброускорений определяются по результатам построенных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в результате реализации построенной математической модели в программных средах Maple, Mathcad. Они соответствуют максимальным значениям (максимальная величина виброускорений колебаний грунта на АЧХ) виброускорениям массы m_1 . Именно эти условия отвечают максимально интенсивному накоплению пластических деформаций грунта.

Научные исследования проводятся в соответствии с научным заданием по гранту Российского научного фонда (РНФ) и Минпрома развития Омской области, тема № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. Т. 20, № 6(94). С. 706–716. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник СибАДИ. 2013. № 3(31). С. 102–107. EDN QAMUGF.
3. Fervers C.W. Improved FEM simulation model for tire–soil interaction // Journal of Terramechanics. 2004. Vol. 41. pp. 87–100.
4. Клигунова З.А., Шишкин Е.А., Клигунов Е.С. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунта в процессе уплотнения дорожным катком // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 25. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN
5. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 26. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>. EDN LAOAAY.
6. Михеев В.В., Угрюмов И.А., Раздобарин Б.А. Принципы повышения эффективности уплотняющих дорожно-строительных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 663–668. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-663-664>. EDNASTIYX
7. Feng Jia, Jie Zhang, Jianjun Shen, Liangfan Wu, Sinuo Ma. Compaction quality assessment of road subgrades using explainable deep graph learning framework // Computers and Geotechnics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106795>.
8. Feng Jia, Fangtao Dong, Sinuo Ma, Jianjun Shen, Zhen Liu. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation // Construction and Building Materials. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135378>.
9. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method // Journal of Building Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>.
10. Мотова М.И., Шалфеев В.Д. От теории колебаний – к нелинейной динамике // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 1. С. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDNSWKELJ
11. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials // Automation in Construction. 2013. Pp. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>
12. Ma Y. et al. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Т. 23. № 9. Pp. 14875–14882.
13. Xu C. et al. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway // Journal of performance of constructed facilities. 2014. Т. 28. № 5. Pp. 04014021.
14. Stepien J, Chomicz-Kowalska A, Tutaj-Dudala M, Dudala M, Maciejewski K, Ramiaczek P, Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. Materials. 2025; 18(3): 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030492>.
15. Shi M. et al. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet // Journal of Construction Engineering and Management. 2022. Т. 148. № 7. Pp. 04022046.
16. Jiao Y. et al. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction // Automation in Construction. 2023. Т. 152. Pp. 104883.
17. Савельев С.В., Сачук Ю.С., Литовченко Р.Е. Обоснование параметров вибрационного пневмошинного катка для уплотнения грунтов при строительстве автодорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 2(73). С. 33–39. EDN GYZEFE.
18. Jonsson, A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor

machine // Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.

19. Зеленков Г.А., Каратаева Н.Г. Математическое моделирование в процессе формирования профессиональных компетенций // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 5-2. С. 76–79. EDN UHGVPF.

20. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 640–644. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.

21. Yao Y.P. et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering // Journal of Construction Engineering and Management. 2018. Т. 144. № 1. С. 04017096.

22. Zhang X. et al. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2020. Т. 8. № 5. С. 159–163.

23. Kuenzel R. et al. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects // Automation in Construction. 2016. Т. 71. pp. 21–33.

24. Вялов С.С. Некоторые проблемы механики грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1970. № 2. С. 10–13. EDN YTDLLN.

25. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 202–216. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX.

26. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). С. 81–88. EDN STVNAD.

27. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness // Automation in Construction. 2024. doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581.

28. Jianhua Li, Xuefei Wang, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality // Advanced Engineering Informatics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102791>.

29. Савельев С.В. Повышение эффективности динамического уплотнения грунтов вибрационными катками при строительстве транспортных объектов // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1. С. 229–236. EDN WZZQTH.

30. Novak M., Han, Y.C. Impedances of soil layer with boundary zone // Journal of Geotechnical Engineering. 1990. V.16. №6. P. 1008–1014.

31. Novak M., Mitwally H. Random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction // Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Transact. 1990. V.112. P. 35–41.

32. Савельев С.В., Литовченко Р.Е., Юрченко А.А. Параметры отпечатка контакта перспективного рабочего органа дорожного катка с опорной поверхностью при уплотнении дорожных материалов // Вестник СибАДИ. 2023; 20(4): 432–442. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>. EDN: EETOYC

33. Mikheyev V.V. New type of vibration generator with vibratory force 326 oriented in preferred direction // Journal of Vibrational Engineering and Technologies. 2018. Vol. 6. No 2. pp. 149–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0025-4>.

34. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3(97). С. 388–394. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN HQAJCW

35. Савельев С.В., Потеряев И.К., Араева О.А., Нигметова К.К. Моделирование взаимодействия вибрационных катков с уплотняемой средой в транспортном строительстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 14–16. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-14-15>. EDN ZJBHPJ

36. Савельев С.В., Потеряев И.К., Раздобарин Б.А. Производительность дорожных катков при уплотнении земляных насыпей автодорог // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2024. № 3(150). С. 90–100. EDN SBIATO.

37. Савельев С.В., Михеев В.В., Иванова Ю.П. К вопросу о повышении эффективности вибрационных дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 2023. № 2. С. 12–14. EDN JAZJWP.

38. Речицкий А.С., Речицкий С.В. Сравнительный анализ уплотнения дорожными катками с различными рабочими органами // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 1(12). С. 79–85. DOI: https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDN FINDAC

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 706–716. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN: IGOKXE

2. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryj G.G. Mathematical description of oscillating system "vibrating working body - ground". *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 102–107. EDN QAMUGF.

3. Fervers C.W. Improved FEM simulation model for tire-soil interaction. *Journal of Terramechanics*. 2004; Vol. 41: 87–100.

4. Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S. Mathematical modeling of the stress-strain state of the soil in the process of compaction by a road roller. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 25: 67–72. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.

5. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>. EDN LAOAAY.
6. Mikheyev V.V., Ugryumov I.A., Razdobarin B.A. Principles of efficiency enhancement for the performance of road-building compaction machines. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 10: 663–668. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-663-664>. EDN AS-TIYX.
7. Feng Jia, Jie Zhang, Jianjun Shen, Liangfan Wu, Sinuo Ma. Compaction quality assessment of road subgrades using explainable deep graph learning framework. *Computers and Geotechnics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106795>.
8. Feng Jia, Fangtao Dong, Sinuo Ma, Jianjun Shen, Zhen Liu. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation. *Construction and Building Materials*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135378>.
9. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>.
10. Motova M.I., Shalfeev V.D. From theory of oscillations to nonlinear dynamics. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2014; T. 22, No 1: 93–103. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. – EDN SWKELJ.
11. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. *Automation in Construction*. 2013: 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>.
12. Ma Y. et al. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021; T. 23. No 9: 14875–14882.
13. Xu C. et al. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway. *Journal of performance of constructed facilities*. 2014; T. 28. No 5: 04014021.
14. Stepień J., Chomicz-Kowalska A., Tutaj-Dudala M., Dudala M., Maciejewski K., Ramiaczek P., Iwanski M.M. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3): 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030492>.
15. Shi M. et al. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022; 148. no 7: 04022046.
16. Jiao Y. et al. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction. *Automation in Construction*. 2023; T. 152: 104883.
17. Savel'ev S.V., Sachuk Ju.S., Litovchenko R.E. Justification of parameters of vibrating pneumatic tire roller for soil compaction during road construction. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2023; 2(73): 33–39. (In Russ.) EDN GYZEFE.
18. Jonsson, A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine. *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden*, 2001: 24.
19. Zelenkov G.A., Karataeva N.G. Mathematical modeling in the process of formation of professional competencies. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2014; T. 10, No 5-2: 76–79. (In Russ.) EDN UHGVPF.
20. Savel'ev S.V., Miheev V.V., Sachuk Ju.S. The effectiveness of the use of vibration in pneumatic tire road rollers in the construction of highways. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2023; 12: 640–644. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.
21. Yao Y. P. et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. T. 144. no 1: 04017096.
22. Zhang X. et al. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020; T. 8. no 5: 159–163.
23. Kuenzel R. et al. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*. 2016; T. 71: 21–33.
24. Vjalov S.S. Some problems of soil mechanics. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1970; 2: 10–13. (In Russ.) EDN YTDLLN.
25. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(2): 202–216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN: BSOEFX
26. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34): 81–88. (In Russ.) EDN STVNAD.
27. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness. *Automation in Construction*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>.
28. Jianhua Li, Xuefei Wang, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102791>.
29. Savel'ev S.V. Increasing the efficiency of dynamic soil compaction by vibrating rollers during construction of transportation facilities. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2016; 1: 229–236. (In Russ.) EDN WZZQTH.
30. Novak M., Han Y.C. Impedances of soil layer with boundary zone. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990; V.I 16. No 6: 1008–1014.

31. Novak M., Mitwally H. Random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction. *Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Transact.* 1990; V.12: 35–41.

32. Saveliev S.V., Litovchenko R.E., Yurchenko A.A. Perspective contact imprint parameters of road roller working body with bearing surface when compacting road materials. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20(4): 432–442. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>. EDN: EETOYC

33. Mikheyev V.V. New type of vibration generator with vibratory force 326 oriented in preferred direction. *Journal of Vibrational Engineering and Technologies.* 2018; Vol. 6. No 2: 149–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0025-4>.

34. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21(3): 388–394. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN: HQAJCW

35. Savel'ev S.V., Poterjajev I.K., Agaeva O.A., Nigmatova K.K. Modeling the interaction of vibratory rollers with compacted medium in transport construction. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU).* 2024; 9: 14–16. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-14-15>. EDN: ZJBHPJ.

36. Savelyev S.V., Poteryaev I.K., Razdobarin B.A. Road roller performance in the highway earth embankment compacting. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering.* 2024; 3 (150): 90–100 (in Russ.). EDN: SBIATO

37. Savelyev S.V., Mikheev V.V., Ivanova Yu.P. To the question of improving the efficiency of vibrating road rollers. *Construction and Road Machines.* 2023; 2: 12–14. (In Russ.) EDN: JAZJWP.

38. Rechitskiy A.S., Rechitskiy S.V. Comparative analysis of compaction by road rollers with different screeds *Fundamental and applied transport issues.* 2024; 1(12): 79–85. (In Russ.) DOI: [10.52170/2712-9195_2024_1_79](https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79). EDN: FNDAC.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Савельев С.В. Разработка модели и анализ результатов (34%).

Потеряев И.К. Проведение обзора (33%).

Бурый Г.Г. Разработка модели (33%).

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

S.V. Savelyev Development of the model and analysis of results (34%)

I.K. Poteryaev Literature review (33%)

G.G. Bury Development of the model (33%)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского госу-

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-код: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Потеряев Илья Константинович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-код: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Бурый Григорий Геннадьевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>,

Scopus Author: 57211267070,

Researcher ID: E-3422-2019,

SPIN-код: 4216-0384,

e-mail: buryy1989@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Saveliev – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Prof. of the Department «Operation of oil, gas and construction equipment», Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-code: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Ilya K. Poteryaev – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, head of the department «Operation of oil, gas and construction equipment», Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-code: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Grigory G. Bury – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Transport Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>,

Scopus Author: 57211267070,

Researcher ID: E-3422-2019,

SPIN-код: 4216-0384,

e-mail: buryy1989@bk.ru