

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst676902>

© Н.А. Федосеев, Н.А. Ермошин, С.В. Алексеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ ВИБРАЦИОННОГО КАТКА

Цель. Выделение основных факторов для решения контактной задачи и последующее определение контактных напряжений под гладким вальцом катка в режиме вибрации.

Материалы и методы. Основой расчетных зависимостей выбрана теория Герца-Беляева. Так же проведен анализ работ Н.Я. Хархуты, А.В. Захаренко, С.В. Носова, С.В. Савельева и других исследователей. Учитывается инерционная составляющая массы катка и периодический характер воздействия внешней силы на грунт.

Результаты. Выделены основные принципы расчета контактных напряжений. Определен физический смысл коэффициентов, позволяющих осуществить переход от статического уплотнения к вибрационному. По результатам анализа предложен новый подход, учитывающий ранее не рассматриваемые характеристики технологического режима уплотнения. Учтены свойства, присущие дисперсному грунту.

Заключение. Статья посвящена изучению взаимодействия вальца катка с грунтом с точки зрения возникающих контактных напряжений. Предложенная методика характеризует контактные напряжения в зависимости от переменных времени и скорости движения катка. Результат, полученный в ходе вычислительного эксперимента, сопоставлен с фактическими данными.

Ключевые слова: грунт; уплотнение грунта; земляное полотно; контактные напряжения; вибрация; вибрационное уплотнение; уплотнение виброкатком.

Как цитировать:

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: 10.17816/transsyst676902

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, N.A. Ermoshin, S.V. Alekseev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

METHOD FOR DETERMINING SURFACE STRESSES UNDER THE ROLLER OF A VIBRATING ROLLER

Aim. Identification of the main factors for solving the surface contact problem and subsequent determination of surface stresses under the flat wheel roller in a vibration mode.

Materials and Methods. The Hertz–Belyaev theory was selected as a basis for the estimation relations. The works of Kharkhuta, Zakharenko, Nosov, Savelyev and other researchers were also analyzed. The inertial component of the roller mass and a periodic nature of the impact of the external force on the soil are taken into account.

Results. The basic principles of calculating surface stresses are identified. The physical significance of the coefficients that facilitate the transition from static to vibration compaction has been determined. Following the analysis, we put forward a new approach that takes into account previously unconsidered characteristics of the compaction process. In addition, the properties inherent in dispersive soil are taken into account.

Conclusion. The paper studies the interaction of the roller wheel with the soil in terms of arising surface stresses. The proposed method characterizes surface stresses depending on the variables of time and roller speed. The result of the computing experiment is compared against the actual data.

Keywords: soil; soil compaction; roadbed; surface stresses; vibration; vibratory compaction; vibrating roller compaction.

To cite this article:

Fedoseev NA, Ermoshin NA, Alekseev SV. Method for determining surface stresses under the roller of a vibrating roller. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):115–133. doi: 10.17816/transsyst676902

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов уплотнения грунта на линейных объектах является его укатка гладковальцовым катком в вибрационном режиме [1–6].

Использование вибрации позволяет снизить рабочую массу машины без уменьшения уплотняющей способности [1, 7, 8].

Как результат, снижается металлоемкость и потребная мощность двигателя, следовательно, уменьшается стоимость машины и затраты на ее эксплуатацию и содержание.

По этой причине на вибрационные катки приходится значимая доля парка уплотняющей техники.

Однако при этом процесс работы катка в вибрационном режиме описан в литературе не так полно, как процесс работы катка в статическом режиме.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Решение контактной задачи применительно к вальцу катка приводится во многих источниках [7–13]. Для сопоставления между собой наиболее распространенных вариантов, предлагаемых разными авторами, составлена Табл. 1.

По данным, приведенным в Табл. 1, можно заметить, что зависимости (1)–(3) и (5), (6) имеют схожую структуру. Это объясняется использованием теории Герца-Беляева [7, 14]. Так как во всех зависимостях рассматривается воздействие вальца катка (абсолютно жесткого тела) на слой грунта (упруго-пластичного тела), то применение теории Герца-Беляева является оправданным.

В первом приближении контактное напряжение определяется как отношение вертикальной составляющей всех сил к площади контакта:

$$\sigma_{\text{е}} = \frac{F_{\text{аадо}}}{S_{\text{е}}} \quad (7)$$

Если определение вертикальной составляющей сил не представляет больших затруднений, особенно для статического случая загрузки [15], то площадь контакта является величиной, зависящей от деформаций грунта (Рис. 1).

Теория Герца-Беляева позволяет определять контактные напряжения без вычисления площади контакта. Это достигается за счет использования

Таблица 1. Основные методы определения контактных напряжений
и их характеристики**Table 1.** Main methods for determining contact stresses and their characteristics

Автор и ссылка на источник	Определение контактных напряжений	
	Формула	Переменные
Хархута Н.Я. [7, 8]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \quad (1)$	q – линейное давление по ширине вальца, МПа; E_0 – модуль деформации грунта, МПа; R – радиус вальца, см.
Хархута Н.Я. [7]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{k_{r\delta} \cdot \frac{P+Q}{B} \cdot E_0}{R}} \quad (2)$	P – амплитудное значение возмущающей силы, кгс; Q – действующая на валец силы тяжести, кгс; B – ширина вальца, см; $k_{r\delta}$ – коэффициент превышения, зависящий от отношения P/Q [7].
Носов С.В. [9,10]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{[q_{r\delta} + K_{\gamma}^2 \cdot q_{r\delta} \cdot a] \cdot E_0}{R}} \quad (3)$	$q_{r\delta}$ – линейная нагрузка на контакте вальца от массы рамы, кгс/см; K_{γ} – коэффициент эффективности использования виброкатка по сравнению со статическим катком [7]; $q_{r\delta} \cdot a$ – линейная нагрузка на контакте вальца и грунта от массы самого вальца, кгс/см.
Савельев С.В., Михеев В.В. [11]	$\sigma_{\epsilon} = \frac{M \cdot g}{2\pi \cdot \alpha_0 \cdot R \cdot B} \quad (4)$	M – масса, приходящаяся на валец, кг; g – ускорение свободного падения, м/с ² ; α_0 – угол раствора, соответствующей по величине дуге окружности, описываемой грунтом вокруг заглубленной части вальца, рад.
Захаренко А.В. [12]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} - T \cdot \sqrt{\frac{E_0}{q \cdot B^2 \cdot R}} \quad (5)$	T – дополнительное давление от вертикальной составляющей тягового усилия, кгс/см ² .
Игнатьев А.А. [13]	$\sigma_{\epsilon} = K_{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{\theta}\right) \quad (6)$	θ – общее время действия напряжений от воздействия вибрационного вальца, с; t – момент времени, на который определяется контактное напряжение, с.

в зависимостях прочностной характеристики грунта (E_0), которая отвечает за осадку под нагрузкой.

Рассмотрим детально формулы (1)–(3) и (5), (6). Формула (1) является прямым следствием теории Герца-Беляева и позволяет определять контактные напряжения от статической нагрузки. Получаемые значения соответствуют наибольшему контактному напряжению на границе валец-грунт. Преимуществом формулы является ее простота и высокая степень достоверности. Расхождения с экспериментальными данными находятся в пределах 5% [7]. Однако при этом результат вычислений представляет собой пиковые значения контактных напряжений на границе валец-грунт и не описывает зависимость контактных напряжений в точке на поверхности грунта от времени.

Формула (5) учитывает воздействие тягового усилия на уплотняемый слой. Тяговое усилие возникает только в том случае, когда валец является ведущим. Динамическая составляющая не учитывается, соответственно воздействие рассчитывается от прохода катка в статическом режиме. Однако влияние тягового усилия невелико даже для статического режима [12]. В случае включенного вибрационного режима учет тягового усилия влияет еще слабее, но при этом добавляет в зависимость неизвестные переменные, требующие дополнительных объемных расчетов и еще одного набора исходных данных.

Формула (3) является модернизированным видом формулы (1). Учтем, что формула (1) применима для статического воздействия вальца, а формула (3) предлагается для вибрационного режима работы катка. Отличие заключается в учете подрессоренной массы рамы, приходящейся на валец катка – как статического воздействия; и в учете произведения массы вальца на коэффициент эффективности – как вибрационного воздействия. Коэффициент эффективности позволяет произвести переход от виброкатка меньшей массы к статическому катку большей при условии равенства уплотняющей способности. Таким образом зависимость (3) не отражает реальных контактных напряжений под вальцом виброкатка, показывая контактные напряжения под вальцом статического катка со сходной уплотняющей способностью. К тому же выражение (3) не имеет зависимости от времени, позволяя определять лишь амплитудные напряжения.

Выражение (6), также являющееся модернизированным видом выражения (1) уже содержит зависимость контактного напряжения от времени, однако все равно по своей сути определяет контактное

напряжение от статического катка с эквивалентной уплотняющей способностью. Еще одним недостатком является отсутствие разделения общего воздействия машины на статическую составляющую и вибрационную составляющую, возникающую вследствие действия возбуждающей силы.

Выражение (2) составлено без использования коэффициента эффективности (K_{γ}), что позволяет прямо учесть вклад возбуждающей силы (P) в суммарное контактное напряжение. Коэффициент превышения ($k_{r\delta}$) зависит от величины возбуждающей силы и меняется в пределах от 5 до 3 [7], но учитывая наличие множителя величиной 0,5 влияние $k_{r\delta}$ уменьшается. Рассмотрим значимость $k_{r\delta}$ оставив из составляющих выражения (2) только две величины – множитель 0,5 и $k_{r\delta}$:

$$0,5 \cdot \sqrt{k_{r\delta}} = 0,5 \cdot \sqrt{[3 - 5]} = [0,87 - 1,12] \quad (8)$$

Коэффициент превышения отражает влияние инерционных сил на изменения контактных давлений за счет колебания дебаланса.

Выражение (4) единственное не опирается на теорию Герца-Беляева. Площадь контакта находится как произведение ширины вальца на длину дуги его контакта с уплотняемой средой. Длина дуги определяется величиной угла α_0 и радиусом вальца. Угол α_0 зависит от глубины осадки вальца в грунт. Глубина осадки вальца определяется изменением коэффициента уплотнения за один проход катка [11]. Соответственно для определения контактного напряжения необходимо знать изменение плотности по результату каждого прохода. Для получения таких данных необходимо либо проводить полевые измерения в процессе уплотнения, либо основываться на модели процесса уплотнения грунта катком. Таким образом, данная зависимость непригодна для определения контактных напряжений в ходе моделирования процесса уплотнения.

Стоит отметить, что в зарубежных исследованиях распространен метод конечно-элементного моделирования (FEM). Этот подход не требует определения контактных напряжений – достаточно найти результирующую величину всех сил, действующих в вертикальном направлении.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Общую нагрузку, действующую на грунт, можно разложить на составляющие: нагрузку от статического воздействия вальца и нагрузку

от вибрационной составляющей. Тогда, согласно методу суперпозиции, найдем контактное напряжение под вальцом вибрационного катка:

$$\sigma_{\text{с}} = \sigma_{\text{ст}} + \sigma_{\text{в}}, \quad (9)$$

На основе анализа методик, приведенного выше, определим контактные напряжения при уплотнении грунта катком в статическом режиме. Наиболее рациональной для расчета является зависимость (1), предложенная Н.Я. Хархутой. Ее недостатком является отсутствие связи контактных напряжений со временем. Определим закон, по которому контактные напряжения от статической нагрузки изменяются во времени.

Рассмотрим точку А на поверхности грунта (Рис. 1). В исходной позиции точка удалена от вальца, каток движется в ее сторону. На следующем этапе точка входит в зону воздействия вальца. Этот момент времени принимается за начальный (t_0):

$$t_0 = 0, \quad (10)$$

При дальнейшем движении катка контактные напряжения от статической составляющей нарастают вплоть до амплитудных значений $\sigma_{\text{ст}}^{\text{амп}}$. Амплитудные контактные напряжения определяются в соответствии с выражением (1):

$$\sigma_{\text{ст}}^{\text{амп}} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}}, \quad (9)$$

Можно считать, что изменение контактных напряжений от статической нагрузки происходит линейно [7, 9, 10]. Наибольшие напряжения соответствуют моменту времени перед разгрузкой грунта и совпадают с вертикальной осью вальца [7] (Рис. 1) – причина асимметричности эпюры контактных давлений в наличии тягового усилия, сдвигающего давление от центра вальца к его краю.

На Рис. 1 изображена схема взаимодействия вальца с грунтом. Грунт, обладая свойствами вязкого тела, демонстрирует отставание развития деформаций от развития контактных напряжений. То есть максимальные деформации наступают уже после окончания действия максимальных контактных напряжений.

С учетом смещения эпюры контактных напряжений в сторону движения катка и отставания деформаций от напряжения можно считать,

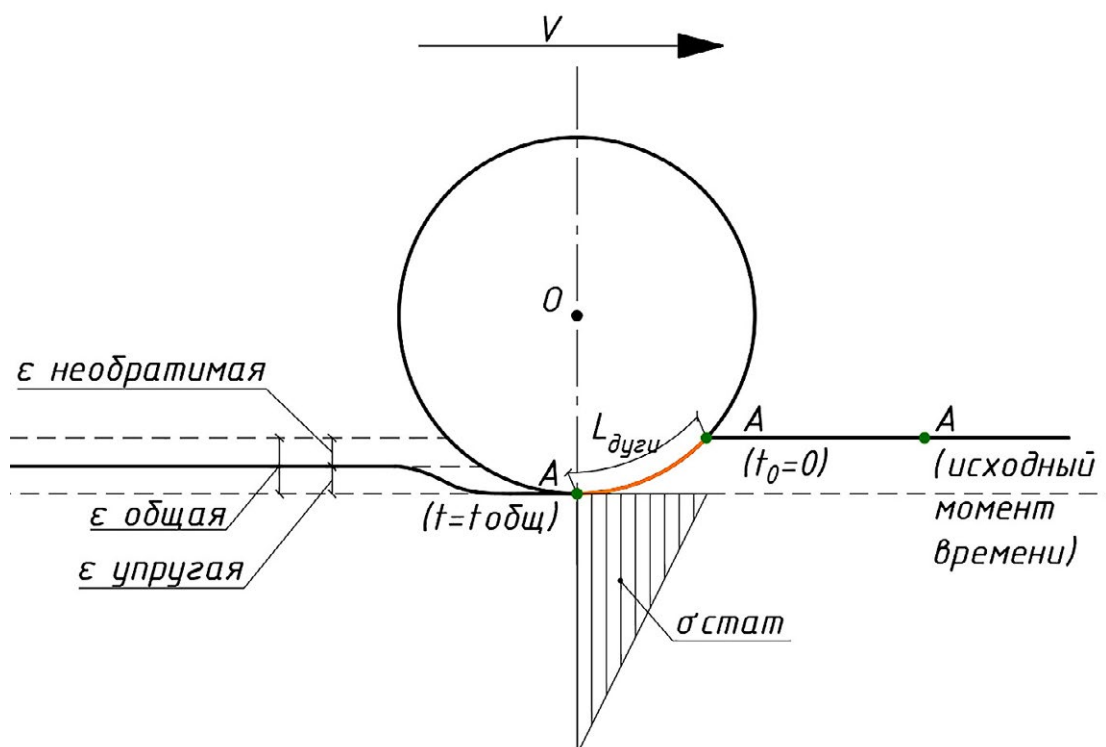


Рис. 1. Схема взаимодействия вальца катка с грунтом (контактные напряжения приведены для статического режима)

Fig. 1. Scheme of interaction between the roller and the soil (contact stresses are given for static mode)

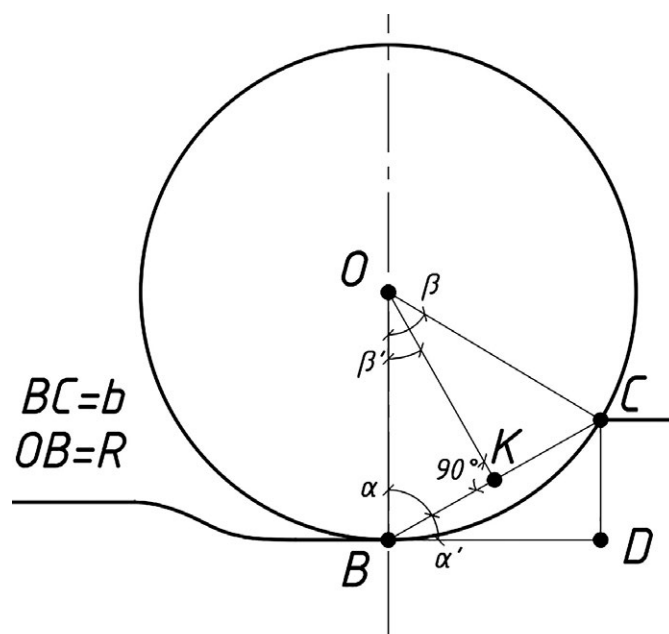


Рис. 2. Схема к определению геометрических параметров процесса уплотнения

Fig. 2. Scheme for determining the geometric parameters of the compaction process

что контактные напряжения распределяются между точкой начала контакта грунта с вальцом и вертикальной осью вальца (Рис. 1).

Н.Я. Хархута приводит зависимость, описывающую величину хорды b , стягивающей точки контакта вальца с грунтом [7]:

$$b = 4 \cdot \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет определить площадь контакта. Следует отметить, что зависимость (12) предполагает расчет в кгс/см, см и кгс/см². Причина этого – эмпирически определенный коэффициент 4, не имеющий размерности и, как следствие, не учитывающий возможности численного решения выражения (12) в размерностях, отличающихся от выше приведенных. Результат расчета выражен в сантиметрах (см).

Рассмотрим треугольник ОВС (Рис. 2). Найдем угол β как удвоенную величину угла β' , а угол β' определим из прямоугольного треугольника ОВК.

Тогда:

$$\beta = 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \quad (13)$$

Величина угла β определена в радианах. Зная радиус вальца, найдем длину дуги на границе контакта вальца с грунтом:

$$L_{\text{дуги BC}} = R \cdot 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \quad (14)$$

Возбуждающая сила, вызывающая вибрации, возникает благодаря вращению дебаланса [1, 3, 4, 8] и для конкретного момента времени находится как:

$$P(t) = P_{\text{дл}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (15)$$

$P_{\text{дл}}$ зависит от параметров дебаланса и либо указывается в технической документации машины (например, как центробежная сила), либо может быть определена из зависимости:

$$P_{\text{дл}} = 39,4 \cdot m_{\text{д}} \cdot r_{\text{д}} \cdot f^2 \quad (16)$$

Контактные напряжения от вибрационного воздействия найдем согласно выражению (7):

$$\sigma_{\text{кон}}(t) = k_{r\delta} \cdot \frac{P(t)}{B \cdot L_{\text{кон}} BC} = k_{r\delta} \cdot \frac{P_{\text{виб}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{B \cdot 2R \cdot \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)} \quad (17)$$

Контактные напряжения от статической составляющей так же зависят от времени. Как уже отмечалось ранее, амплитудные значения наступают в точке А (Рис. 1) в момент прохождения над этой точкой вертикальной оси вальца. Соответственно скорость изменения величины контактных напряжений в точке А прямо зависит от скорости поступательного движения катка.

Найдем длину горизонтальной проекции хорды b . Для этого рассмотрим треугольники ОВС и ВСD (Рис. 2). Искомый катет ВD составляет:

$$BD = b \cdot \cos(\alpha') \quad (18)$$

Угол α' (градусы) можно определить с помощью треугольника ОВС:

$$\alpha' = 90^\circ - \alpha \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ - \beta}{2} \quad (20)$$

Угол β (радианы) вычислен ранее с помощью зависимости (13). Тогда угол α' (радианы) будет равен:

$$\alpha' = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi - 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)}{2} = 0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \right) \quad (21)$$

Катет ВD определяется выражением:

$$BD = b \cdot \cos\left(0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \right)\right) \quad (22)$$

Длина катета ВD соответствует расстоянию, которое проходит каток нагружая точку А на пространстве грунта. В начальный момент времени (t_0) точка А находится на правой границе эпюры контактных напряжений (Рис. 1), напряжения равны нулю. В конечный момент времени ($t_{\text{кон}}$) точка

А находится на левой границе эпюры контактных напряжений (Рис. 1), напряжения максимальны.

Общее время воздействия вальца на грунт за один проход зависит от скорости движения катка:

$$t_{\text{вд}} = \frac{BD}{v} = \frac{b \cdot \cos\left(0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)\right)}{v} \quad (23)$$

Из подобия треугольников определим значение контактных напряжений от статической составляющей в точке А в момент времени t (Рис. 1):

$$\sigma_{\text{ст}}(t) = \sigma_{\text{ст}} \cdot \frac{t}{t_{\text{вд}}} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \frac{t \cdot v}{b \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)} \quad (24)$$

Подстановка значения b в выражение (24) не правомерна из-за эмпирического характера b , сказывающегося на размерности (см. выражение (12)).

В соответствии с равенством (9) запишем выражение, определяющее значение контактных напряжений от статического и вибрационного воздействий одновременно в зависимости от времени. Учтем так же, что линейное давление по ширине вальца q определяется отношением веса катка, приходящегося на валец, к ширине вальца. Подставим значение b в слагаемое, отвечающее за динамическое воздействие:

$$\sigma_{\text{с}}(t) = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \frac{t \cdot v}{b \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)} + k_{\text{в}} \cdot \frac{P_{\text{в}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{B \cdot 2R \cdot \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)} \quad (25)$$

Выражение (25) имеет граничные условия. Контактные напряжения в точке А развиваются только в период движения вальца катка над ней – во все остальное время контактные напряжения равны нулю. Граничные условия задаются зависимостью (26):

$$t_0 \leq t \leq t_{\text{вд}} \quad (26)$$

С учетом граничных условий общие контактные напряжения определяются системой выражений:

$$\sigma_{\varepsilon}(t) = \begin{cases} \hat{\alpha}_0 + \hat{\beta}_0 t & \text{if } t \in [0, T] \\ 0 & \text{if } t \notin [0, T] \end{cases}$$

Коэффициент превышения $k_{\gamma\delta}$ зависит от соотношения возбуждающей силы и веса, приходящегося на валец [7]:

$$k_{r\delta} = -0,2016 \frac{P}{O} + 5,3332 \quad (27)$$

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ

Для оценки адекватности полученной зависимости (25) проведено сравнение с зависимостями (1)–(3), (6). Зависимости (5) и (4) не рассматриваются, так как результат вычислений зависимости (5) имеет малые отклонения от результата вычисления выражения (1), а зависимость (4) требует для ее численного решения иметь набор входных данных, получаемых в результате полевого измерения осадки грунта в процессе уплотнения.

Для численного решения задачи различными методами выбран каток НАММ 3516 со следующими характеристиками (Табл. 2):

Таблица 2. Технические характеристики гладковальцового катка HAMM 3516

Table 2. *Technical specifications of the HAMM 3516 smooth drum roller*

Параметр	Соответствующая переменная	Численное значение
Масса, приходящаяся на валец	M , кг	9305
Частота колебаний	f , Гц	40
Амплитудная возбуждающая сила	$P_{ai\ r e}$, кН	215
Ширина вальца	B , мм	2140
Радиус вальца	R , мм	752
Рабочая скорость, принятая при расчете	v , км/ч	2
Коэффициент превышения	$k_{\gamma \delta}$	4,86
Поддрессоренная масса рамы	$q_{i i a}$, кг	4485
Вертикальная составляющая тягового усилия	T , кН	7

В качестве уплотняемой среды назначен песчаный грунт с коэффициентом плотности (по методу стандартного уплотнения РосДорНИИ) 0,85, что соответствует начальному этапу уплотнения после доставки грунта автомобилями-самосвалами и его распределения бульдозерами. Модуль деформации (E_0) составляет 20 МПа.

Результат численного эксперимента представлен на Рис. 3.

Из рисунка Рис. 3 видно, что контактные напряжения, рассчитанные по предложенной выше зависимости, могут принимать отрицательные значения. Так как грунт не воспринимает растягивающие напряжения,

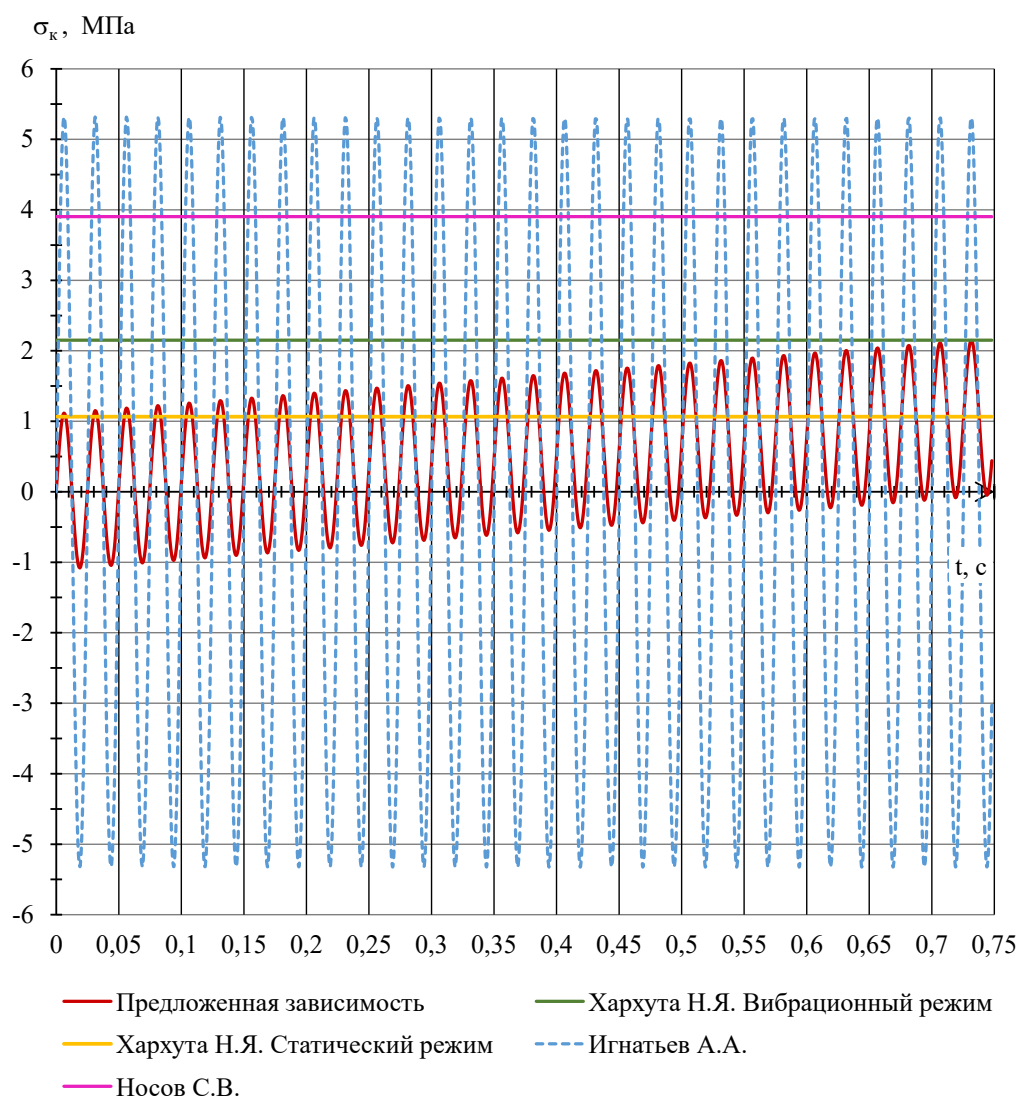


Рис. 3. Сопоставление контактных напряжений в зависимости от времени при использовании различных методик

Fig. 3. Comparison of contact stresses over time when using different methods

то отрицательные контактные напряжения невозможны [16, 17]. Необходимо ввести дополнительные граничные условия:

$$\sigma_{\epsilon}(t) = \begin{cases} \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) & \text{если } \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) > 0 \\ 0 & \text{если } \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) \leq 0 \end{cases}$$

На Рис. 4 показана откорректированная зависимость контактных напряжений от времени. Для сравнения на Рис. 4 представлены результаты расчета по выражениям, предложенные Н.Я. Хархутой.

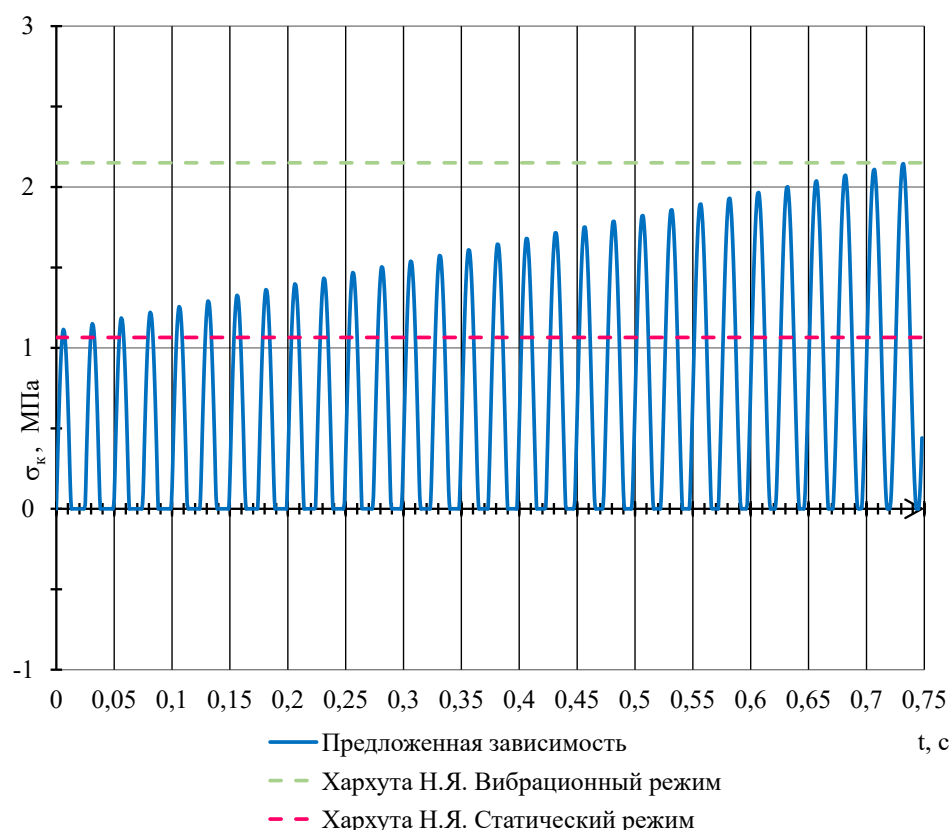


Рис. 4. Сопоставление контактных напряжений в зависимости от времени при использовании различных методик

Fig. 4. Comparison of contact stresses over time when using different methods

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены различные методы определения контактных напряжений. Так как контактные напряжения вызваны перемещающимся объектом — вальцом катка, то необходим учет изменения величины контактных напряжений во времени.

Методики, не отражающие временной характер нагружения, не могут в полной мере дать оценку воздействия рабочего органа на грунт. В соответствии с рисунком 3 характер нагрузки является циклическим.

Существующие методики, использующие переменную времени, не учитывают характер движения катка и, как следствие, постепенное возрастание доли статической нагрузки в общем напряжении.

Следует обратить внимание, что ряд авторов использует переменную K_{γ} для перехода от теоретических выкладок Герца-Беляева, разработанных для случая статического нагружения, к вибрационному нагружению. Однако эта переменная показывает, во сколько раз меньшей массой может обладать вибрационный каток по отношению к статическому без потери уплотняющей способности. Физический смысл K_{γ} не связан с контактным напряжением, а сама величина K_{γ} зависит от гранулометрического состава грунта. Результатом использования данной переменной для перехода к вибрационной нагрузке является излишнее завышение контактных напряжений (для случая уплотнения песка) или же занижение (для случая уплотнения глин). Столь значительные отклонения расчетных значений от фактических (данные Н.Я. Хархуты, подтвержденные экспериментами, можно принять за фактические) не позволяют оценить режим работы катка с точки зрения соблюдения рационального диапазона контактных напряжений (близких к пределу прочности, но не превышающих его).

Предложенная методика расчета учитывает фактор времени как в отношении поступательного перемещения вальца вдоль уплотняемой полосы, так и в отношении вибрационного воздействия. Учет инерционных сил производится за счет использования коэффициента превышения. Кроме того, принимается во внимание свойство грунта – отрицательные напряжения не возникают. Результат расчетов коррелирует с зависимостями Н.Я. Хархуты, выведенными для амплитудных значений напряжений. Вышеперечисленное говорит о применимости методики для определения контактных напряжений в любой момент времени на границе грунт-ваlec при работе катка в режиме вибрации.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костельов М.П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2004. С. 72–82. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/9-dorozhnaya-tehnika-2004-2-s72-82.pdf>
2. Сонин В.В. Обзор технологий усиления слабых оснований дорожных насыпей // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 5. С. 104–107.
3. Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками. // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2008. С. 40–47. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
4. Тимофеев Д.М. Основные факторы и их зависимости, определяющие оптимальные режимы работы вибрационных катков при уплотнении песчаных грунтов // Инженерный вестник дона. 2019. № 1(52).
5. Тюремнов И.С., Краюшкин А.С., Шорохов Д.А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком НАММ 3411 // Вестник сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. № 6 (88). С. 828–840. doi: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840
6. Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г., Белодед А.С. Методика обоснования режимных параметров вибрационных катков для уплотнения грунтов // Вестник сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 1 (53). С. 27–33. doi: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-27-33
7. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1975.
8. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов: Теория, расчет и конструкции. Москва; Ленинград: Машгиз, 1953.
9. Носов С.В. Методология совершенствования технологий уплотнения дорожно-строительных материалов. Липецк: Липецкий гос. технический ун-т, 2015.
10. Носов С.В. Математическое моделирование процесса уплотнения дорожно-строительных материалов жестким вальцом дорожного катка // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 31–35. EDN: QCEJOT
11. Михеев В.В., Савельев С.В. Моделирование характеристик деформируемых грунтов в процессе их уплотнения цилиндрическими рабочими органами катков // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 4 (50). С. 29–36. EDN: WZQPZV

12. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2005.
13. Игнатьев А.А. Определение рациональных параметров вибрационных катков для уплотнения грунта: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2013.
14. Малич Н.Г., Блохин В.С. Особенности уплотнения среды вальцами катков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 345–355. EDN: KKOYR
15. Кондрашов Н.А. Исследование и расчет параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий: дис. ... кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2016. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: https://dis.spbgasu.ru/file/1783/download?token=Waer_8Lm
16. Бугров А.К. Механика грунтов. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.
17. Федосеев Н.А., Алексеев С.В., Шевченко С.М. Обзор теоретических предпосылок к уплотнению грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 2. С. 200–214. doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

REFERENCES

1. Kostel'ov MP. Possibility and efficiency of compaction of soils of various types and conditions using vibratory rollers. Catalogue-reference book "Road equipment and technologies". 2004:10–18. Accessed: 12.12.2024. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/9-dorozhnaya-tehnika-2004-2-s72-82.pdf>. (In Russ.)
2. Sonin VV. Review of technology for strengthening weak foundations of road embankments. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016;(5):104–107. (In Russ.)
3. Kostel'ov MP. Again about the quality and efficiency of compaction of various soils with modern vibratory rollers. *Katalog-spravochnik "Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii"*. 2008:40–47. Accessed: 12.12.2024. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf> (In Russ.)
4. Timofeev DM. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Inzhenernyi vestnik dona*. 2019;1(52). (In Russ.)
5. Tyuremnov IS, Krayushkin AS, Shorokhov DA. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2022;6(88):828–840. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840
6. Saveliev SV, Poteryaev IK, Buriy GG, Beloded AS. Method of justification of operational parameters of vibrating rollers for compaction. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2017;1(53):27–33. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-27-33
7. Harkhuta NYa. *Strength, stability and compaction of roadbed soils*. Moscow: Transport; 1975. (In Russ.) Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006957405>
8. Harkhuta NYa. *Soil Compaction Machines: Theory, Calculation and Design*. Moscow; Leningrad: Mashgiz; 1953. (In Russ.)

9. Nosov SV. *Methodology for improving technologies for compacting road construction materials*. Lipeck: Lipeckij gos. tekhnicheskij un-t; 2015. (In Russ.)
10. Nosov SV. Mathematical modeling of the process of compaction of road construction materials by a rigid roller of a road roller. *Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2013;4:31–35. (In Russ.) EDN: QCEJOT
11. Miheev VV, Savel'ev SV. Modeling the characteristics of deformable soils during their compaction by cylindrical working bodies of rollers. *Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2016;4(50):29–36. (In Russ.) EDN: WZQPZV
12. Zakharenko AV. *Theoretical and experimental studies of the processes of compaction of soils and asphalt concrete mixtures by rollers* [abstract of the dissertation]. Omsk; 2005. (In Russ.)
13. Ignat'ev AA. *Determination of rational parameters of vibratory rollers for soil compaction* [abstract of the dissertation]. Yaroslavl; 2013. (In Russ.)
14. Malich, NG, Blohin VS. Features of compaction between rollers. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2008;8:345–355. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12363969>
15. Kondrashov NA. *Research and calculation of parameters of a multifunctional roller for compaction of asphalt concrete road surfaces* [dissertation]. St. Petersburg; 2016. Accessed: 12.12.2024. Available from: https://dis.spbgasu.ru/file/1783/download?token=Waer_8Lm (In Russ.)
16. Bugrov AK. *Mekhanika gruntov: schoolbook*. St. Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo un-ta; 2011. (In Russ.)
17. Fedoseev NA, Alekseev SV, Shevchenko SM. A review of the theoretical preconditions for soil compaction. *Modern transportation systems and technologies*. 2024;2(10):200–214. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

Сведения об авторах:

Федосеев Никита Александрович, аспирант;

eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;

E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент;

eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;

E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Information about the authors:

Nikita A. Fedoseev, graduate student;

eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;

E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Nikolaj A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, professor;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Sergey V. Alekseev, Candidate of Military Sciences, associate professor;

eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;

E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com