

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 2. С. 215–225.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (2): 215–225.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.855.03:624.042.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-215-225

EDN: TZCGPC

К ВОПРОСУ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОЕЗЖУЮ ЧАСТЬ С УЧЕТОМ НЕРОВНОСТЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

Андрей Владимирович Картопольцев¹,
Александр Аверьянович Алексеев²

¹ООО «ДИАМОС». г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Большое количество результатов исследований свидетельствует о возрастающей роли динамического воздействия временной подвижной нагрузки на конструктивные элементы транспортных сооружений более чем в 2–3 раза по сравнению со статическими воздействиями, в т. ч. на покрытия проезжей части дорог и мостов за счет неровностей на поверхности. Выявление взаимодействия динамической нагрузки на плиту асфальтобетонного покрытия проезжей части с учетом неровностей представляется актуальной, обладающей научной новизной задачей.

Цель работы. Рассматривается движение автотранспорта по асфальтобетонному покрытию проезжей части с учетом неровности как случайный процесс. Требуется оценить влияние вертикального ускорения и скорости движения транспорта на изменение динамических характеристик.

Результаты. Выявлены дополнительные динамические нагрузки, напряжения и деформации за счет динамического воздействия от проходящего по неровности подвижного случайного транспортного потока.

Ключевые слова: плита, колебания, соударения, неровности, ускорение, время

Для цитирования: Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу воздействия динамической нагрузки на проезжую часть с учетом неровностей асфальтобетонного покрытия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 215–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-215-225. EDN: TZCGPC

ORIGINAL ARTICLE

ON THE DYNAMIC LOAD IMPACT ON THE ROADWAY WITH RESPECT TO SURFACE IRREGULARITIES

Andrey V. Kartopol'tsev¹, Aleksandr A. Alekseev²

¹ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Many research results testify to a 2–3 times increase in the dynamic load on the structural elements of transportation structures compared to static loads, including road and bridge pavements due to surface irregularities. The load-slab interaction is identified for the road pavement taking into account surface irregularities.

Purpose: The analysis of the vertical acceleration and vehicle speed effect on changes in dynamic characteristics.

Research findings: Additional dynamic loads, stresses and deformations due to dynamic load from random traffic flow are identified for the bridge elements.

Keywords: pavement slab, vibrations, collision, surface irregularities, acceleration, time

For citation: Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A. On the Dynamic Load Impact on the Roadway with Respect to Surface Irregularities. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (2): 215–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-215-225. EDN: TZCGPC

При движении груза по неровному покрытию проезжей части его траектория зависит не только от неровности, но и от прогиба покрытия, как упругой системы на упругоподатливом полупространстве, обладающего эффектом «паразитного» изгиба [1] (рис. 1).

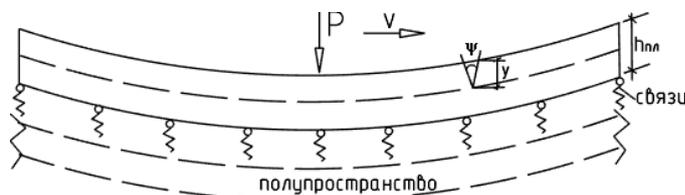


Рис. 1. Схема сил, действующих при движении по неровной проезжей части с учетом совместной деформации с полупространством

Fig. 1. Forces acting during traffic movement on irregular surface with respect to half-space deformation

Вертикальное перемещение $y(x, t)$ от движущегося транспорта складывается из двух функций: первая $y(x, t)$ зависит от реологии деформации асфальтобетонной плиты покрытия, вторая $f(x)$ – функция, определяющая профиль неровности. Фрагмент записи неровности поверхности асфальтобетонного покрытия представляется аппроксимацией функции $f(x)$ (рис. 2).

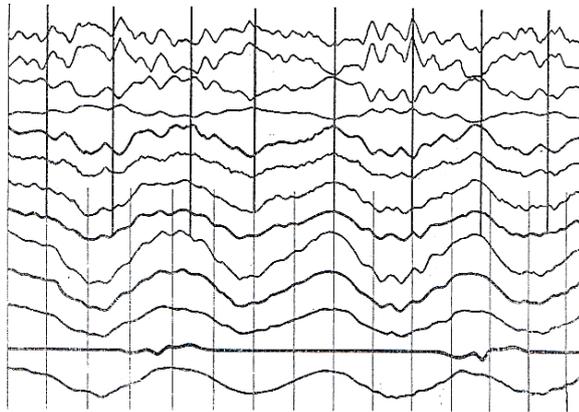


Рис. 2. Профилограммы неровностей поверхности асфальтобетонного покрытия (общий вид)

Fig. 2. Force profiles for traffic movement on irregular surface with respect to half-space deformation

Прогиб плит в функции $y(x, t)$ пропорционален давлению R , которое оказывает движущее транспортное средство по неровности. Для того чтобы определить R , надо к весу движущейся нагрузки прибавить силу инерции $\frac{P}{q} \frac{d^2y}{dt^2}$, где P – вес нагрузки.

С учетом скорости движения транспорта выражение $\frac{P}{q} \frac{d^2y}{dt^2}$ запишем в виде равенства

$$\frac{dy}{dt} = V \frac{dy}{dx}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = V^2 \frac{d^2y}{dx^2}. \quad (1)$$

Если принять $R = P \left(1 - \frac{V^2}{q} \frac{d^2y}{dx^2} \right)$, то

$$y = P \left(1 - \frac{V^2}{q} \frac{d^2y}{dx^2} \right) \frac{x^2 (1-x)^2}{3EI}, \quad (2)$$

где $y = \frac{P \cdot x^2 (1-x)^2}{3EI}$; l – расчетная длина плиты; x – координата приложения нагрузки. Тогда

$$R = P \left(1 + \frac{V^2}{q} \frac{P \cdot l}{3EI} \right). \quad (3)$$

Максимальный динамический прогиб в сечении $l/2$ плиты от ударного воздействия будет

$$y_{\text{дин}} = y_R \left(1 + \frac{V^2}{q} \frac{P \cdot l}{3EI} \right). \quad (4)$$

Инерционное ускорение деформирования плиты покрытия зависит от мгновенного очертания оси покрытия и от положения движущегося транспорта по ней. Выражение для скорости в точке приложения нагрузки будет иметь вид

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} \frac{dx}{dt} + \frac{dy}{dt}. \quad (5)$$

В этом случае функция микропрофиля неровности плиты проезжей части является случайной, стационарной и функцией измеряемых вертикальных ускорений. Амплитуда ускорений вертикальных колебаний асфальтобетонной плиты подчиняется нормальному закону распределения вероятностей, и, следовательно, она полностью определяется средней квадратичной ускорения. Максимальное ускорение является величиной случайной. Вертикальное ускорение движения плиты запишем в виде равенства

$$\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dx^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{d^2 y}{dx dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) + \frac{dy}{dx} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{d^2 y}{dt^2}. \quad (6)$$

Обозначим $\frac{dx}{dt} = V$, а $\frac{d^2 x}{dt^2} = a_y$, тогда

$$\ddot{y} = V^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + a_y \frac{dy}{dx} + 2V \frac{d^2 y}{dt dx}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что вертикальное ускорение \ddot{y} зависит от скорости движения транспорта по неровности. Учет влияния неровностей на колебательный процесс и расчет асфальтобетонных плит покрытия состоит в определении слагаемых функции $y(x, t)$ и аппроксимации функции $f(x)$. Экспериментально доказано, что случайное событие практически невозможно, если вероятность его появления менее 0,007. В этом случае вертикальное ускорение плиты подчиняется нормальному закону распределения вероятностей со средним значением \ddot{y}_0 , близким к нулю, для определения возможного значения максимального вертикального ускорения \ddot{y}_{max} справедливо равенство

$$\ddot{y}_{\text{max}} \approx 2,63 \ddot{y}_0. \quad (8)$$

Таким образом, максимальное вертикальное ускорение деформирования плиты \ddot{y}_{max} невозможно, если вероятность его появления менее 0,001. Необходимо выполнение условия

$$\ddot{y}_{\text{max}} \approx 3,32 \ddot{y}_0. \quad (9)$$

Данное обстоятельство указывает на то, что с вероятностью, близкой к единице, в случае нормального распределения максимальное ускорение примерно в 3 раза больше его среднеквадратичного значения в виде показателя $\alpha_{\ddot{y}}$ [2]:

$$\alpha_{\ddot{y}} = \frac{\ddot{y}_{\max}}{\ddot{y}_0} . \tag{10}$$

Оценивая неровности на плите проезжей части ординатами случайного стационарного процесса $x(t)$ как случайные величины, среднее значение неровности плиты $q_{\text{ср}}$ следует оценивать статистическими характеристиками профиля (рис. 3).

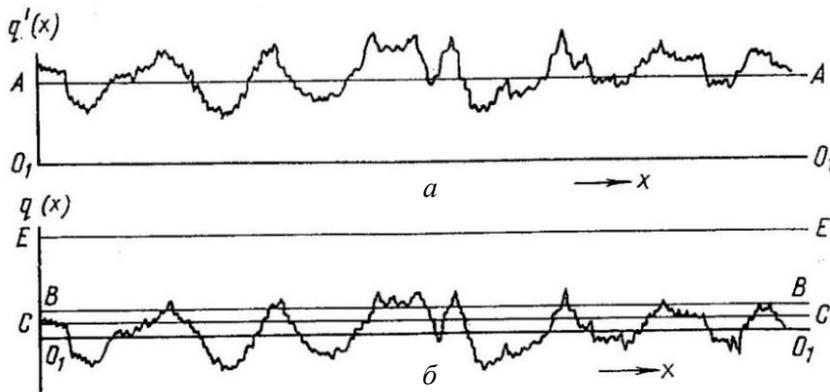


Рис. 3. Реализация случайной функции (а) и ее среднее значение (б)
 Fig. 3. Patterns of random function (a) and its average value (b)

Таковыми оценочными характеристиками являются:

- средняя ордината профиля или математическое ожидание;
- среднеквадратичное отношение или дисперсия ординат;
- корреляционная функция или спектральная плотность.

Принимаем за $q'(x)$ ординату профиля неровностей проезжей части, отсчитываемую от горизонтали O, O_1 (см. рис. 3), тогда осредненное значение по совокупности реализаций выборки дает следующее значение:

$$q_{\text{ср}} = \lim_{L_q \rightarrow \infty} \frac{1}{L_q} \int_0^{L_q} q(x) dx , \tag{11}$$

где L_q – длина реализации выборки \approx длине неровности.

Величина $q_{\text{ср}}$ соответствует прямой AA центрированной функции $f(x)$. Колебания на этом участке микропрофиля неровностей соответствуют $t = 2\pi/P_0$, P_0 – частота собственных колебаний плиты. Стационарный процесс случайной функции, аппроксимирующей профиль неровности на проезжей части на протяжении L_q одной реализации выборки, представлен на рис. 4.

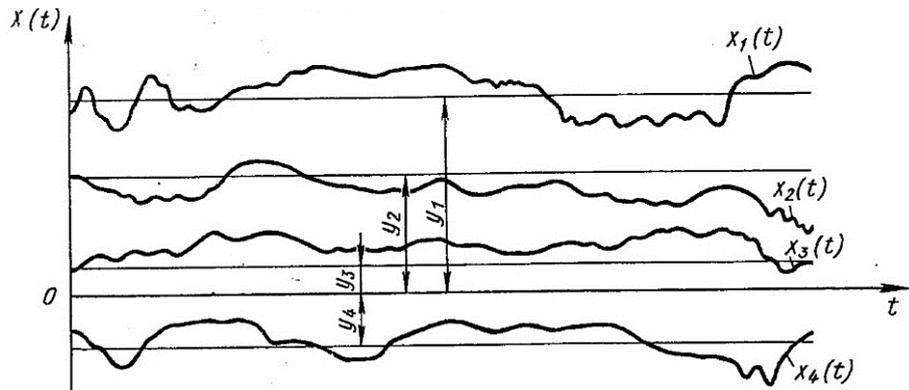


Рис. 4. Стационарный случайный процесс $X(t)$, имеющий случайную величину
 Fig. 4. Stationary random process $X(t)$ with random variable

Представляем случайный процесс $X(t)$ функции $f(x)$ рядом Фурье с периодической функцией периода 2π на отрезке (ab) (рис. 5) длиной $2t$.

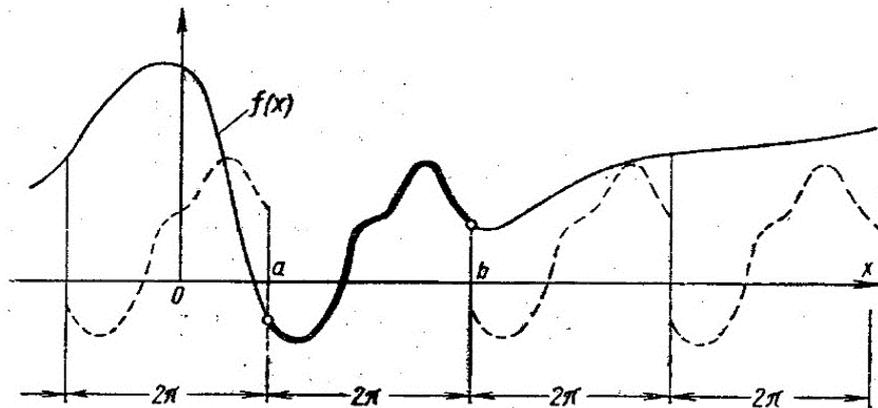


Рис. 5. Представление функции $f(x)$ рядом Фурье
 Fig. 5. Fourier's series of function $f(x)$

Разложение в ряд Фурье функции $f(x)$ на отрезке x длиной $2t$, на котором происходит разложение функции, разбивается на конечное число областей, равных 2π с предельным значением a , b слева и справа. Случайные колебания на отрезке ab описываются средним значением спектральной плотности с осреднёнными результатами динамических характеристик, меняющиеся в пределах a , b .

Кривая ab представляет собой площадь, равную среднему квадрату спектральной плотности. Определяющей в спектральной плотности является область с низкими характеристиками (область t . a) и с высокими показателями (область t . b). Например: аппроксимируем неровности (см. рис. 3–5) со спектральной плотностью Θ и функцией неровности $f(x) = y_i = y_0 \sin \gamma \cdot t$ (рис. 6).

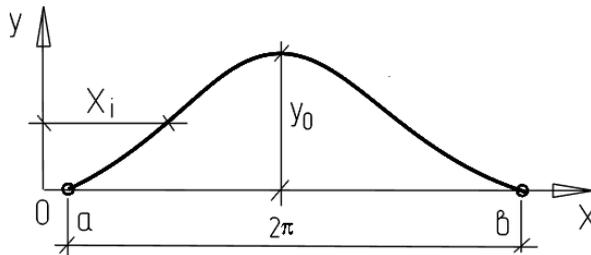


Рис. 6. Аппроксимация неровности функции $f(x)$
 Fig. 6. Approximation of irregularity function $f(x)$

Запишем закон гармоничной нагрузки случайного процесса γ в виде

$$\gamma = \Theta \cdot V, \quad (12)$$

где V – скорость проезда неровности длиной L_q ; Θ – спектральная плотность или частота неровностей на длине выборки L_q , равная $2\pi / L_q$; $L_q \rightarrow f(V)$.

Время проезда неровности равно:

$$t = \frac{3,6L_q}{V}. \quad (13)$$

Если принять, что $\gamma = \frac{2\pi \cdot V}{L_q} = \frac{3,6L_q}{V}$, закон случайного процесса окончательно имеет вид

$$\gamma = \frac{2\pi \cdot V}{3,6L_q}. \quad (14)$$

В этом случае спектральная плотность или частота неровностей плиты адекватна спектральной плотности дополнительной реакции в подвеске автомобиля, вызванной движением по неровности, и находится как произведение спектральной плотности профиля неровности Θ на квадрат частотной характеристики данной реакции в подвеске $Q_p^{\text{подв}}$ или может быть получена с помощью корреляционной функции, которая близко отображает статистические свойства профиля неровностей плиты и хорошо аппроксимируется, с учетом взаимодействия колеса автомобиля с неровностями и скоростью движения, функцией вида [3, 4]:

$$R_q(t) = D_x \cdot e^{-\alpha \frac{V}{t}} \cos \beta \cdot V \cdot t, \quad (15)$$

где D_x – дисперсия центрированных ординат профиля неровностей плиты проезжей части; α , β – коэффициенты корреляции функции неровностей при $V = 1$ м/с.

Значения D_x , α , β определяются с учетом размеров неровностей поверхности плиты. Для асфальтобетонных плит покрытия при $\sqrt{D_x}$ (мм), равных 12, $\alpha_{V=1 \text{ м/с}} \approx 0,22$; $\beta_{V=1 \text{ м/с}} \approx 0,44$, отношение коэффициентов корреляции $\frac{\beta}{\alpha} \approx 1-3$.

При случайном характере распределения неровностей просматривается изменение дисперсии D_x процесса от скорости движения V (рис. 7).

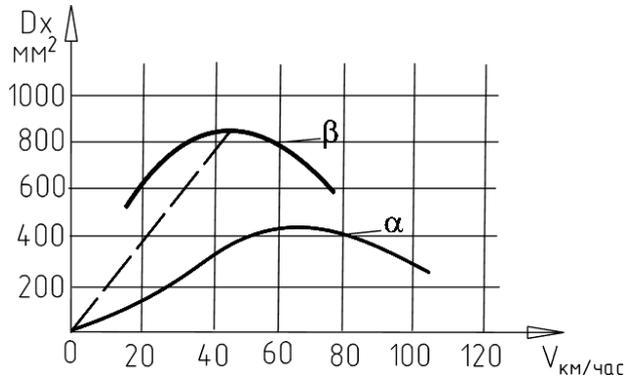


Рис. 7. Значения коэффициентов корреляции α , β от величины дисперсии D_x и скорости движения V

Fig. 7. Correlation coefficients α , β derived from dispersion D_x and speed of movement V

Общеизвестна обратно пропорциональная зависимость коэффициентов корреляции α , β среднему значению длины неровностей L_q , и чем больше эта величина, тем время корреляции будет меньше и тем более пологой и широкой будет функция спектральной плотности неровностей Θ . Тогда частотная характеристика спектральной плотности дополнительной реакции в подвеске $Q_p^{\text{подв}}$ будет определяться выражением

$$Q_p^{\text{подв}} = \Theta \cdot P_p^{2n}, \quad (16)$$

где P_p^{2n} – квадрат частотной характеристики дополнительных реакций в подвеске от проезда автомобиля через неровности.

Например: при $V = 40$ км/ч $P_p \approx 0,22-2,5$ Гц и $L_q \approx 0,5-4,0$ м; $V > 40$ км/ч $P_p = 3,1$ Гц и $L_q \approx 1,6-6,0$ м.

Максимальное перемещение (прогиб) плиты адекватно амплитуде возмущения оси подвески автомобиля, проходящего по неровности:

$$y_{\text{max}} = A_{\text{max}} = m_k \cdot r_k \cdot V_{\text{кол}}^2, \quad (17)$$

где r_k – радиус колеса автомобиля; $m_k = \frac{1}{2} m_{\text{подв}}$ – масса колеса; $m_{\text{подв}}$ – масса подвески.

Следовательно, деформативность асфальтобетонной плиты прямо пропорциональна деформации колебания подвески автомобиля при проезде через неровности. Сжатие в подвеске является отражением проявления передаточной функции от колес автомобиля на плиту и выражается в виде равенства [5, 6]:

$$F = C(Y + Z), \quad (18)$$

где C – жесткость подвески, равная жесткости шин; Y – сжимающая сила в подвеске,

$$Y = \frac{C \cdot k^2 \cdot y_0}{2(k^2 - \omega^2)} [\cos \omega t - \cos kt],$$

где $t = t_0 - t_1$ – время проезда неровности; $k = \frac{2\pi V}{L_q}$; $Z = Y_0$ – перемещение плиты, равное перемещению подвески; $\omega = \frac{C}{m_2}$ – колебания подвески; m_2 – масса подвески; y_0 – высота неровности (см. рис. 6).

Силу F , которая является передаточной функцией силы от колес автомобиля на плиту, рекомендуется определять по формуле [7, 8]:

$$F = k \cdot Y_0 = \frac{m_2 \cdot \omega^2 \cdot a_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}, \quad (19)$$

где a_0 – перемещение рессор автомобиля.

Для многоосного современного автотранспорта собственные частоты ω вертикальных колебаний в зависимости от микропрофиля плиты проезжей части определяются по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \sum C_i}{m_a}}, \quad (20)$$

где m_a – масса автомобиля.

Будем считать, что для двухосных автомобилей $i = 2$ значение собственных частот ω ограничивается верхним допустимым пределом, а для $i > 4$ – нижним пределом. Принимаем для двухосного автомобиля частоту за 100 %, тогда для многоосных автомобилей снижение составляет 21–32 %, в зависимости от количества осей автомобиля > 2 .

Выводы

Таким образом, рассматривая деформативность асфальтобетонной плиты и деформации подвески автомобиля в функции движения колес по упруговязкой полуплоскости при условии, что трение шины колеса автомобиля отсутствует, можно сделать вывод, что замена дуги окружности отпечатка колеса перед неровностью на параболу дает возможность записать уравнение движения колеса в виде (рис. 8) [9]:

$$f(x) = A_1 \cdot R + A_0, \quad (21)$$

где $A_1 = 1/R$; $A_0 = -\alpha_a \cdot y_k / R$; α_a – коэффициент трансформации асфальтобетонной плиты, равен 0,72–0,8; y_k – прогиб плиты под колесом.

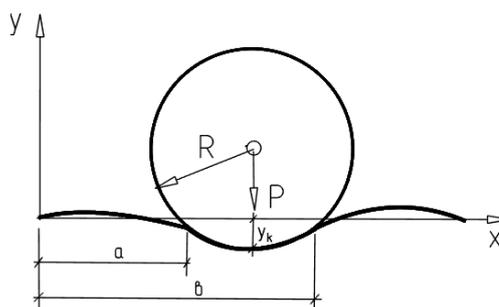


Рис. 8. Движение колеса автомобиля по деформированной плите
Fig. 8. Wheel movement over deformed pavement slab

Обозначая P как вертикальную силу, действующую от колеса на плиту, а $P(x)$ как давление под колесом на плиту, запишем равенство:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\sqrt{\frac{2q}{A_1} + \frac{2A_0}{A_1^2} - \frac{A_0}{A_1}} \\ b &= \sqrt{\frac{2q}{A_1} + \frac{2A_0}{A_1^2} - \frac{A_0}{A_1}} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где $q = \frac{P(1+\nu)}{4\pi\mu}$; μ – коэффициент Пуассона; ν – кривизна неровности под колесом.

При использовании формулы (22) было принято условие, что смещения плиты и основания совпадают, а трение отсутствует. Следовательно, собственная деформация верхнего слоя плиты является функцией только реактивных усилий от силы P .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Триус Е.Б. Изгиб плиты на упругом основании при нежёстком контакте с основанием // Научные доклады высшей школы. Строительство. 1958. № 3, 4. С. 1–2.
2. Пархиловский И.Г. Об определении эксплуатационного требования к плавности хода автомобилей // Автомобильная промышленность. 1966. Вып. XXXII. № 1. С. 1–3.
3. Пчелин И.К., Хачатуров А.А. Нелинейные колебания автомобиля при движении по дороге с реальным микропрофилем // Автомобильная промышленность. 1965. № 5. С. 17–19.
4. Пархиловский И.Г. Спектральная плотность распределения неровностей микропрофиля дорог и колебания автомобиля // Автомобильная промышленность. 1961. № 10. С. 25–28.
5. Ефимов П.П. К вопросу о динамических возмущениях, вызванных движением автомобиля по неровному покрытию проезжей части мостов // Теоретические и экспериментальные исследования мостов и строительных конструкций. 1970. № 3. С. 65–73.
6. Федоров Ю.П. Движение системы поддресорных масс по балке с неровностью // Применение ЭВМ в строительной механике. Киев : Наукова Думка, 1968. С. 351–354.
7. Шупляков В.С. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля. Москва : Транспорт, 1974. 328 с.
8. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. 4-е изд. Москва : Изд-во АН СССР, 1954. 648 с.
9. Картопольцев В.М., Алексеев А.А., Параев Б.А. К теории расчета конструктивных элементов из анизотропного материала с упруговязкопластическими свойствами // Вестник Том-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 230–242. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-230-242. EDN: YCCUPP

REFERENCES

1. *Trius E.B.* Bending of Slab on Elastic Bed at Non-Rigid Contact with the Base. *Nauchnye doklady vysshei shkoly. Stroitel'stvo*. 1958; (3, 4): 1–2. (In Russian)
2. *Parkhilovskii I.G.* About Operational Requirement to Smooth Ride. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 1966; 32 (1): 1–3. (In Russian)
3. *Pchelin I.K., Khachaturov A.A.* Nonlinear Oscillations of Vehicle Driving on Real Micro-profile Surface. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 1965; (5): 17–19. (In Russian)
4. *Parkhilovskii I.G.* Spectral Density Distribution of Micro-Profile Irregularities and Vehicle Vibrations. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 1961; (10): 25–28. (In Russian)
5. *Efimov P.P.* About Dynamic Disturbances Caused by Traffic Movement on the Uneven Surface of bridge. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya mostov i stroitel'nykh konstruksii*. 1970; (3): 65–73. (In Russian)
6. *Fedorov Yu.P.* Movement of Sprung Mass System over Surface Irregularities. *Primenenie EVM v stroitel'noi mekhanike*. Kiev: Naukova Dumka, 1968, Pp. 351–354. (In Russian)
7. *Shuplyakov V.S.* Fluctuations and Loading of Automobile Transmission. Moscow: Transport, 1974. 328 p. (In Russian)
8. *Muskhelishvili N.I.* Basic Problems of Mathematical Model of Elasticity. 4th ed. Moscow, 1954. 648 p. (In Russian)
9. *Kartopol'tsev V.M., Alekseev A.A., Paraev B.A.* Towards Calculation of Anisotropic Constructive Elements with Elastic-Plastic Properties. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (4): 230–242. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-230-242. EDN: YCCUPP (In Russian)

Сведения об авторах

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Authors Details

Andrey V. Kartopol'tsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025
Одобрена после рецензирования 05.02.2025
Принята к публикации 04.03.2025

Submitted for publication 22.01.2025
Approved after review 05.02.2025
Accepted for publication 04.03.2025