

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. № 3. С. 247–256.

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 (3): 247–256.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.855.03:624.042.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-247-256

EDN: XVVLXX

О ВОЗДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ НА АСФАЛЬТОБЕТОННУЮ ПЛИТУ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ С НЕРОВНОСТЯМИ

Владимир Михайлович Картопольцев^{1,2},
Александр Аверьянович Алексеев¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Рассматривается актуальная задача анализа ударного воздействия временной автомобильной подвижной нагрузки при движении по покрытию проезжей части с неровностями.

Цель работы. Анализ дополнительного динамического эффекта, вызываемого неровностями плиты проезжей части.

Результаты. Ударная сила, действующая на плиту с учетом неровностей проезжей части от движения транспортных средств, определена в виде комплексной функции в зависимости от параметров движения транспорта, инерции и перемещений в плите.

Ключевые слова: удар, инерция, неровности, нагрузка, частота, период, скорость

Для цитирования: Картопольцев В.М., Алексеев А.А. О воздействии подвижной нагрузки на асфальтобетонную плиту проезжей части с неровностями // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 3. С. 247–256. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-247-256. EDN: XVVLXX

ORIGINAL ARTICLE

LIVE LOAD EFFECT ON A CARRIAGEWAY SLAB WITH IRREGULARITIES

Vladimir M. Kartopol'tsev^{1,2}, Aleksandr A. Alekseev¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. The paper studies the live load impact on the road pavement with irregularities.

Purpose: The analysis of the additional dynamic effect caused by irregularities of the carriageway slab.

Research findings: The impact load acting on the slab, considering the unevenness of the roadway from the vehicle movement, is determined as a complex function depending on the traffic parameters, inertia and slab motion.

Keywords: impact, energy, irregularities, load, frequency, carriageway slab, speed

For citation: Kartopol'tsev V.M., Alekseev A.A. Live Load Effect on a Carriageway Slab with Irregularities. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (3): 247–256. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-247-256. EDN: XVVLXX

Движение автомобильного транспорта в виде одиночных экипажей или случайного транспортного потока по асфальтобетонному покрытию проезжей части дорог и мостов с неровностями на поверхности типа впадин или выступов вызывает дополнительные колебания в плите вследствие периодических или одиночных ударов колес. Ударная нагрузка от падающих колес автомобиля во впадину (с выступа) некоторой глубины h представляется в виде последовательности периодически повторяющихся импульсов, например, прямоугольной формы и величины S с использованием обобщенной функции теории соударения тел по методу Герца [1]. Величину импульсной нагрузки $P(t)$ запишем в виде

$$P(t) = S \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - n \cdot T), \quad (1)$$

где δ – функция Дирака; t – продолжительность удара колеса по плите; $T = \frac{L}{V}$ – период повторных импульсов; L – расстояние между осями автомобиля; V – скорость движения автомобиля; $n = 1, 2, \dots$ – количество осей автомобиля;

$S = m_1 \cdot V_1 = \int_0^t F(t) dt$ – конечный импульс; $m_1 = m_1' + m_1''$ – масса ударной нагрузки; m_1' – масса неподрессорной нагрузки; m_1'' – масса поддрессорной нагрузки; $V_1 = \sqrt{V_0^2 + 2qh}$ – скорость центра тяжести груза перед началом удара;

V_0 – скорость движения колес автомобиля до соударения; h – глубина или высота неровности.

Считается, что удар колеса автомобиля об асфальтобетонную плиту покрытия является неупругим в силу того, что после соударения осуществляется совместное движение колеса автомобиля и плиты из-за отсутствия местных деформаций сжатия на площадке контакта вследствие того, что жесткость асфальтобетонной плиты нежесткой дорожной одежды намного больше жесткости шины колеса автомобиля [2]. Ударная сила колеса за счет неровности включает конечную скорость центра тяжести падающего колеса перед соударением с плитой при условии свободного падения. Данный фактор учитывается в равенстве для определения импульса S :

$$S = m_1 \cdot V_1. \quad (2)$$

Рассматривая дифференциальное уравнение движения колеса перед соударением с плитой в проекциях X и Y , запишем равенство с начальными условиями: $t = 0, x = 0, y = h, \dot{x} = V, \dot{y} = 0$ (рис. 1):

$$m_1 \cdot \ddot{x} = 0, \quad m_1 \cdot \ddot{y} = -Q_{гр}, \quad (3)$$

где $Q_{гр}$ – вес падающего груза (колеса) автомобиля, имеющего некоторую скорость движения V в горизонтальном направлении из условия свободного падения.

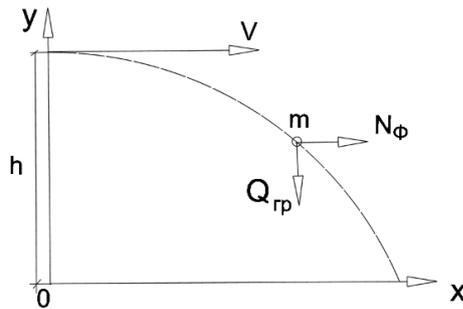


Рис. 1. Движение колеса при падении
Fig. 1. Wheel movement when falling

В момент соударения начальная скорость движения плиты (изгиб) V_0 определяется из закона сохранения количества энергии движения:

$$(m_1 + m)V_0 = m_1 \cdot V_1 + m \cdot V_2, \quad (4)$$

где V_2 – скорость перемещения (изгиба) плиты покрытия до соударения, $V_2 = 0$; V_1 – скорость совместного движения колеса автомобиля и плиты после соударения; V_0 – начальная скорость движения колеса.

Тогда
$$V_0 = \frac{m_1}{m} V_1, \quad (5)$$

где $m = m_1 + m_{пл}$ – общая масса системы «плита + колесо»; $m_{пл}$ – масса плиты; $m_1 = m_1' + m_1''$.

Динамический эффект, вызываемый неровностями поверхности асфальтобетонной плиты покрытия проезжей части, является значительным и возрастает с увеличением скорости транспортных средств.

Проезд неровностей заключается в подъезде к ним с последующим упиранием, сопровождающимся появлением горизонтальных N_Φ и вертикальных $Q_{гр}$ составляющих после съезда. Это представляет собой дополнительные динамические нагрузки на плиту, которые адекватны увеличению прогиба, связанного с повышением скорости транспорта [3].

Горизонтальная сила N_Φ появляется за счет увеличения скорости движения по плите при сходе с неровности и увеличивает амплитуду колебаний плиты на Δu при приложении к ее центру тяжести:

$$N_\Phi = \frac{V^2 \cdot A \cdot \gamma}{q}, \quad (6)$$

где $\gamma = \frac{C \cdot q}{2P_0}$; $C = 2\sqrt{\frac{k_\Phi \cdot P}{q}}$; P – вес оси транспорта; $k_\Phi = 0,833$ – для плит прямоугольной формы поперечного сечения;

$$P_0 = \frac{a \cdot i^2 \cdot \pi^2}{l_p^2} \sqrt{1 - \frac{N_\Phi \cdot l_p^2}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot EJ}}$$

$a^2 = \frac{E \cdot J \cdot q}{A \cdot \rho}$; $i = 1$; A – площадь поперечного сечения плиты.

Влияние скорости V при прохождении по неровности на величину N_Φ и Δu характеризуется введением коэффициента скорости V_α , равного

$$V_\alpha = \frac{V \cdot \rho}{\pi \cdot a}; \quad a = \sqrt{\frac{E \cdot J \cdot q}{A \cdot \rho}}, \quad (7)$$

где q , ρ – ускорение свободного падения, удельная плотность материала плиты.

В момент схода транспорта с неровности при $t_1 = \frac{Lq}{V}$ динамический прогиб равен

$$y_{дин} = \frac{2P \cdot l_p^3}{E \cdot J \cdot \pi^4} \frac{1}{1 - V_\alpha}, \quad (8)$$

где l_p – расчетная длина плиты; $\frac{1}{1 - V_\alpha}$ – динамический прогиб в плите за счет удара при сходе нагрузки с неровности.

Связь между горизонтальной силой N_Φ и коэффициентом скорости a выражается зависимостью

$$a^2 = \frac{N_\Phi \cdot l_p^2}{E \cdot J \cdot \pi^2} = \frac{V^2 \cdot l_p^2}{V_\alpha^2 \pi^2}, \quad (9)$$

где $V_\alpha^2 = \frac{V^2 \cdot l_p^2}{\pi^2}$.

Дополнительный прогиб в плите Δu в реальных условиях ниже теоретического по причине того, что при проезде через неровности происходит эффект некоторого затухания давления оси автомобиля на плиту за счет срабатывания рессорной части подвески, характеризуемый коэффициентом затухания в функции скорости и времени прохождения колеса через неровности [4]. Например, при прохождении колеса через неровность со скоростью $V = 40$ км/ч коэффициент затухания в рессорах $\varepsilon_p \approx 0,34$.

В этом случае среднее ускорение движения плиты за счет динамического эффекта можно принять равным $a_y = (0,3 - 0,6)g$ м/с² [5]. Собственная частота колебаний рессор при этом равна

$$P_{0p} = \sqrt{\frac{2C}{m}}, \quad (10)$$

где $2C$ – жесткость рессор; m – масса подрессорной части подвески.

Коэффициент относительного сопротивления подвески (реакция отпора) при прохождении через неровность будет равен

$$k_p = \varepsilon_p \cdot P_{0p} \approx 0,15 - 0,3. \quad (11)$$

Представим обобщенное давление колеса автомобиля на плиту проезжей части после съезда с неровности:

$$P_{0\delta} = (P' + P'') \left(1 + 4\pi^2 \frac{y_{ст} \cdot V^2}{q \cdot L_q^2} \right), \quad (12)$$

где $y_{ст}$ – статический прогиб плиты под осью автомобиля; P' – вес подрессорной части оси автомобиля; P'' – вес неподдрессорной части автомобиля; L_q – длина неровности.

Ударная сила колеса в этом случае [6] равна

$$Q_{уд} = P_{0\delta} \cdot X \frac{i \cdot \pi \cdot V_1 \cdot t}{L_q}, \quad (13)$$

где t – время движения по неровности; L_q – длина неровности; $i = 1$; V_1 – скорость движения колеса автомобиля с учетом ускорения за счет схода с неровности. Обобщенная сила удара колеса передней оси транспорта состоит из ударного воздействия веса передней оси $(P' + P'') \sin \frac{i \cdot \pi \cdot V_1 \cdot t}{L_q}$ и воздействия от вибрации передней оси за счет рессор $(P' + P'') \cos P_{0\delta}$.

Тогда
$$Q_{уд}^{0\delta} = (P' + P'') \cos P_{0p} \cdot t \sin \frac{i \cdot \pi \cdot V \cdot t}{L_q}. \quad (14)$$

Вибрация передней оси за счет рессор зависит от типа рессор и передаточного числа i_F , равного

$$i_F = \frac{y_c}{y_i}, \quad (15)$$

где y_c – перемещение рассматриваемой подвески; y_i – прогиб плиты под колесом.

При $i_F = 1$ $y_c = y_i$. В случае равенства жесткости подвесок или амортизаторов статическому прогибу y_i соответствует максимальная амплитуда колебаний плиты, равная глубине дефекта неровности. Если суммарную частоту собственных колебаний подвесок автомобиля и плиты проезжей части после съезда с неровности обозначим через P_0 , которая равна $P_0' + P_0''$, то запишем выражение вида

$$P_0^2 = \frac{C_{\text{подв}}}{m_0}, \quad (16)$$

где $C_{\text{подв}}$ – приведенная жесткость подвесок оси; m_0 – масса автомобиля, приходящая на ось подвески.

Тогда затухание колебаний в подвеске и плите ε_p происходит по закону пропорциональности масс, и коэффициент затухания [7] будет равен

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{4\pi \cdot \lambda \cdot P_0^2}{P_0^n}}, \quad (17)$$

где λ – коэффициент распределения массы автомобиля по осям; P_0^n – частота собственных колебаний подвески автомобиля; P_0 – частота собственных колебаний плиты.

При $\lambda = 1$ выполняется условие независимости колебаний задних и передних частей автомобиля; $\lambda = 0,8-1,2$ – колебания поддрессорной массы автомобиля под передней и задней подвесками считаются практически несвязанными. При $\lambda = 0,7-1,4$ колебания осуществляются только массой m_0^3 задней поддрессорной части автомобиля, равной

$$m_0^3 = m \frac{a \cdot b - r^2}{(a + b)^2}, \quad (18)$$

где m – общая масса поддрессорной части автомобиля; $a \cdot b$ – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней (a) и задней (b) оси; r – радиус инерции автомобиля поперек оси, проходящей через центр тяжести.

Если известна частота собственных колебаний левой и правой подвески автомобиля $P_{0Л}^C$; $P_{0П}^C$, запишем условие

$$P_{0Л}^C = \frac{Z_{л.п}}{m_{л.п}}, \quad (19)$$

где $Z_{л.п}$ – жесткость соответственно левой и правой подвески; $m_{л.п}$ – масса, приходящая на левую и правую подвески.

Период и частота собственных колебаний плиты определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{k_\phi \cdot q}}; \\ P_0 &= \frac{2\pi}{T_0}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В зависимости от диаметра колеса автомобиля, участвующего при проезде по неровности, и его ударного воздействия амплитуда собственных колебаний плиты будет равна

$$A_0 = m_k \cdot R_k \cdot V^2, \quad (21)$$

где R_k – диаметр колеса; m_k – масса колеса; V^2 – квадрат скорости движения колеса по неровности.

Для многоосного транспорта ($i > 3$) в виде случайного транспортного потока сила, действующая на плиту от проходящих через неровности транспортных средств, определяется как $P(t) = f(C_p, V_i, f_x)$.

Тогда интенсивность равномерно распределенной нагрузки от прохождения по неровностям транспорта $q(x)$ равна

$$q(x) = q_0(1 - \cos \omega t), \quad (22)$$

где $\omega = \frac{2\pi \cdot C}{L_q}$ – круговая частота; C – жесткость, равная жесткости шин авто-

мобиля и вычисляемая по формуле $C = 0,5(C_1^{\text{пер}} + \sum C_i^{\text{зад}})$:

– для 2-осных автомобилей $C = 0,5(C_1^{\text{пер}} + C_2^{\text{зад}})$;

– для 3-осных $C = 0,5\left(C_1^{\text{пер}} + \frac{C_2^{\text{зад}} + C_3^{\text{зад}}}{2}\right)$;

– для 4-осных $C = 0,5\left(C_1^{\text{пер}} + \frac{C_2^{\text{зад}} + C_3^{\text{зад}} + C_4^{\text{зад}}}{2}\right)$;

– для 5-осных $C = 0,5\left(C_1^{\text{пер}} + \sum \frac{C_i^{\text{зад}}}{2}\right)$;

$q_0 = \frac{\sum P_i}{L_q}$; $\sum P_i$ – суммарная нагрузка на ось проходящего по неровности

транспорта.

Тогда, зная скорость движения транспорта по неровности V и частоту собственных колебаний автомобиля, собственную частоту колебания плиты можно определить [5] по формуле

$$P_0 = 4 \sqrt{\frac{4q_0 \pi^2}{q \cdot EI T_0^2}}, \quad (23)$$

где $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{q_0 \cdot L_q^3}{48EI}}$; $q = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Влияние собственной частоты колебаний многоосных автомобилей на частоту собственных колебаний плиты характеризуется коэффициентом α_{po} , равным

$$\alpha_{po} = \frac{P_0^{\text{авт}}}{P_0}, \quad (24)$$

где $P_0^{\text{авт}}$ – частота собственных колебаний многоосного автомобиля.

Одновременно с ударным воздействием при движении многоосной нагрузки по неровностям плиты проезжей части наблюдается так называемый волновой эффект, возникающий при инерционном изгибе плит. Представим синусоидальные изгибные волны выражением вида [8, 9]:

$$y = A \cos(\Theta \cdot t - f_x), \quad (25)$$

где A – амплитуда волн (прогибов) плиты; $f_x = 0,5h(1 - \cos\Theta \cdot t)$; h – высота (глубина) неровности; $\Theta = 2\pi \cdot C / L_q$; C – безразмерная скорость распространения изгибной синусоидальной волны, $C = \sqrt{E/m} / V$; V – скорость движения ав-

томобиля.

Особенность волнового эффекта заключается в том, что скорость распространения предполагаемых изгибных волн в плите выше, чем аналогичная ско-

рость волн сдвига C_γ на величину $k = \frac{C}{C_\gamma} \approx 2$, где $C_\gamma = \sqrt{\frac{k_\phi \cdot G}{m}} / V$; $G = \frac{E}{2}$.

Тогда волновое уравнение с учетом затухания колебаний в плите от воздействия многоосного автомобиля [10] запишем в виде

$$\frac{dQ}{dx} - \varepsilon_p \frac{dy}{dx} - R_{(y)} = m_V \cdot J \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

где $R_{(y)}$ – реакция плиты; m_V – масса единицы объема плиты; J – момент

инерции сечения плиты $Q = k_\phi \cdot G \cdot A \left(\frac{dy}{dx} - \varphi \right)$; $\varphi = \arctg A$ – фазовый сдвиг на угол φ , указывает на то, что колебания автомобиля и плиты могут находиться в противоположной фазе, сдвинутой на угол φ .

Таким образом, колеблющиеся автомобиль и плита проезжей части в противофазе выполняют роль взаимного дебаланса в колебательном процессе.

Выводы

Колебания плиты проезжей части вследствие воздействия периодических или одиночных неупругих ударных воздействий колес автомобиля, вызванных движением по неровностям покрытия проезжей части, следует рассматривать в виде последовательности периодических повторяющихся импульсов теории соударения тел методом Герца с учетом упругости системы «плита + автомобиль». Динамические характеристики системы увеличиваются с возрастанием конечной скорости и высоты падения колеса с неровности, а также с увеличением скорости движения и ускорения автомобиля и плиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гольдсмит Вернер. Удар: Теория и физические свойства соударяемых тел / пер. с англ. М.С. Лужиной, О.В. Лужина. Москва : Стройиздат, 1965. 447 с.
2. Картопольцев В.М. К вопросу вибродиагностики свободных колебаний балок методом Герца // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 242–252. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252
3. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Москва, 1959. 336 с.
4. Барченков А.Г., Котуков А.Н., Сафронов В.С. Применение корреляционной теории для динамического расчета мостов // Строительная механика и расчет сооружений. 1970. № 4. С. 43–48. EDN: YGAOHT
5. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля: Колебания и плавность хода. Москва : Машиностроение, 1972. 392 с.
6. Тимошенко С.П., Юнг Д. Инженерная механика. Москва : Машгиз, 1960. 507 с.
7. Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. К вопросу о колебании системы «автомобиль + пролетное строение» при совпадении центров масс и жесткости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 6. С. 251–259.
8. Тимошенко С.П. Теория колебаний в инженерном деле. Ленинград ; Москва : Гос. науч.-техн. из-во, 1934. 344 с.
9. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1955. 192 с.
10. Сретенский Л.Н. Упругие волны, возникающие от нормальных напряжений, приложенных к поверхности полупространства // Проблемы механики сплошной среды. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1961. С. 411–427.

REFERENCES

1. Goldsmith Werner. Impact. The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids. Moscow: Stroizdat, 1965, 447 p. (Russian translation)
2. Kartopol'tsev V.M. Free Vibration Measurement of Beams Using Hertz's Method. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (3): 242–252. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252 (In Russian)
3. Timoshenko S.P. Vibrations in Engineering. Moscow, 1959. 336 p. (In Russian)
4. Barchenkov A.G., Kotukov A.I., Safronov V.S. Application of Correlation Theory in Dynamic Analysis of Bridges. *SMRS*. 1970; (4): 43–48. (In Russian)
5. Rotenberg R.V. Car Suspension. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 385 p. (In Russian)
6. Timoshenko S.P., Jung D. Engineering Mechanics. Moscow: Mashgiz, 1960. 503 p. (In Russian)
7. Kartopol'tsev A.V., Kolmakov B.D. Vehicle/Span System Oscillation at Coincident Centre of Mass and Stiffness. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; (6): 251–259. (In Russian)
8. Timoshenko S.P. Vibration Theory in Engineering. Leningrad, Moscow, 1934. 344 p. (In Russian)
9. Kol'skii G. Stress Waves in Elastic Bodies. Moscow: The Foreign Languages Publishing House, 1955. 192 p. (In Russian)

10. *Sretenskii L.N.* Elastic Waves Arising from Normal Stresses Applied to the Surface of a Half-Space. In: Problems of Continuous Mechanics. Moscow, 1961. Pp. 411–427. (In Russian)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; 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

Vladimir M. Kartopol'tsev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; 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 14.01.2025
Одобрена после рецензирования 31.01.2025
Принята к публикации 19.02.2025

Submitted for publication 14.01.2025
Approved after review 31.01.2025
Accepted for publication 19.02.2025