

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

УДК 624.04

Моделирование системы «платформа – модель здания» с сейсмоизолирующим поясом

Чл.-кор. НАН Таджикистана, докт. техн. наук, проф. Д. Н. Низомов¹⁾,
докт. техн. наук, проф. И. К. Каландарбеков²⁾,
канд. техн. наук, доц. И. И. Каландарбеков³⁾

¹⁾Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан),

²⁾Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими

(Душанбе, Республика Таджикистан),

³⁾Белорусский национальный технический университет – Таджикский технический университет
имени академика М. С. Осими (Душанбе, Республика Таджикистан)

Реферат. Разработаны алгоритмы численного решения динамических задач моделей зданий с сейсмоизолирующим поясом при расположении плоскости скольжения на различных уровнях. Алгоритмы учитывают нелинейное поведение конструкции, связанное с перемещениями в области скользящего слоя, и позволяют проводить моделирование с учетом различных параметров изоляции. Разработана компьютерная программа, реализующая предложенные алгоритмы. Она позволяет рассчитывать динамический отклик зданий при различных сейсмических воздействиях, учитывая геометрические и механические характеристики конструкции. В программе реализованы численные методы интегрирования уравнений движения, что обеспечивает точность и устойчивость вычислений. Проведены расчеты моделей зданий с сейсмоизоляцией при различных параметрах системы, включая высоту расположения плоскости скольжения, жесткость надземной части и характеристики демпфирования. Получены результаты, показывающие влияние этих факторов на поведение сооружения при сейсмических нагрузках. Анализ результатов показал, что расположение плоскости скольжения оказывает значительное влияние на динамическую реакцию здания. В частности, более низкое расположение слоя скольжения способствует снижению передаваемых на надземную часть ускорений, что приводит к уменьшению внутренних усилий и повышению общей сейсмостойкости конструкции. Предложенные алгоритмы и программа могут быть использованы при проектировании зданий с сейсмоизоляцией, а также при оценке их надежности в условиях различных сейсмических воздействий.

Ключевые слова: модель здания, скользящий пояс, сила трения, математическое моделирование, коэффициент жесткости, плоскость скольжения, коэффициент затухания

Для цитирования: Низомов, Д. Н. Моделирование системы «платформа – модель здания» с сейсмоизолирующим поясом / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, И. И. Каландарбеков // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 297–306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

Адрес для переписки

Каландарбеков Ифтихор Имоморбекович
Таджикский технический университет
имени академика М. С. Осими
просп. академиков Раджабовых, 10А,
734042, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Тел.: +992 (372) 21-35-11
iftikhor791@mail.ru

Address for correspondence

Qalandarbekov Iftikhor Imomyorbekovich
Tajik Technical University
named after academician M. S. Osimi
10A, Academicians Rajabov's Avenue,
734042, Dushanbe, Republic of Tajikistan
Tel.: +992 (372) 21-35-11
iftikhor791@mail.ru

Modeling of the System “Platform – Building Model” with a Seismic Isolation Belt

D. N. Nizomov¹⁾, I. K. Kalandarbekov²⁾, I. I. Kalandarbekov³⁾

¹⁾Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan),

²⁾Academician M. S. Osimi Tajik Technical University (Dushanbe, Republic of Tajikistan),

³⁾Belarusian National Technical University – Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi (Dushanbe, Republic of Tajikistan).

Abstract. Algorithms for the numerical solution of dynamic problems of building models with a seismic-isolating belts when the sliding plane is located at different levels have been developed. The algorithms take into account the nonlinear behavior of the structure associated with displacements in the area of the sliding layer, and allow for modeling taking into account various insulation parameters. A computer program implementing the proposed algorithms has been developed. It allows to calculate the dynamic response of buildings under various seismic effects, taking into account the geometrical and mechanical characteristics of the structure. The program implements numerical methods for integrating equations of motion, which ensures the accuracy and stability of calculations. Calculations of seismic-insulated building models with different system parameters, including the height of the sliding plane location, stiffness of the above-ground part and damping characteristics, have been carried out. The results showing the influence of these factors on the behavior of the structure under seismic loads have been obtained. The analysis of the results showed that the location of the sliding plane has a significant effect on the dynamic response of the building. In particular, the lower location of the sliding layer contributes to the reduction of accelerations transmitted to the above-ground part, which leads to a decrease in internal forces and an increase in the overall seismic resistance of the structure. The proposed algorithms and program can be used in the design of buildings with seismic insulation, as well as in the assessment of their reliability under various seismic effects.

Keywords: building model, sliding belt, friction force, mathematical modelling, stiffness coefficient, sliding plane, damping coefficient

For citation: Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2025) Modeling of the System “Platform – Building Model” with a Seismic Isolation Belt. *Science and Technique*. 24 (4), 297–306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306> (in Russian)

Введение

Сейсмоизолирующие опорные конструкции скользящего типа за счет сил сухого трения обеспечивают жесткую кинематическую связь сооружения с колеблющимся основанием до тех пор, пока суммарная инерционная сила в системе не превысит определенного уровня – порога срабатывания, величина которого зависит от коэффициента трения и конфигураций поверхностей скольжения фундамента [1–8].

Разработкой и исследованиями сейсмоизоляции зданий и сооружений занимались Б. М. Абрамов [9], А. М. Алексеев [10], Г. А. Джинчелашвили [11], О. А. Савинов [12, 13] и многие другие. Вопросы сейсмоизоляции с резино-металлическими опорами рассмотрены в работах А. М. Курзанова, О. В. Мкртычева, Д. Н. Низомова и др.

Повышение сейсмической безопасности и снижение затрат на антисейсмические мероприятия возможны в случае интенсивного совершенствования методов, способов и технических средств защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий и является важной проблемой, решение которой имеет большое научно-практическое значение.

Можно отметить, что наиболее важным направлением современной науки о сейсмостойком строительстве становится разработка способов сейсмозащиты и расчетной оценки их эффективности на основе различных динамических моделей систем «сооружение – изоляция – фундамент – основание» с учетом характера сейсмического воздействия в форме инструментальных записей землетрясений.

Формирование расчетной модели

Рассматривается многомассовая расчетная модель здания с элементами сухого трения, где плоскость скольжения расположена между массами m_1 и m_2 . Масса m_2 расположена непосредственно над скользящим поясом. Предполагается, что модель здания в общем виде испытывает кинематическое возмущение в опорной части $z_0(t)$ и действие горизонтальной вибрационной нагрузки $p(t)$, приложенной к массе m_1 . Между массами m_1 и m_2 существует связь в виде сил сухого трения при смещении массы m_2 относительно масс m_1 в пределах зазора Δ_1 (рис. 1а).

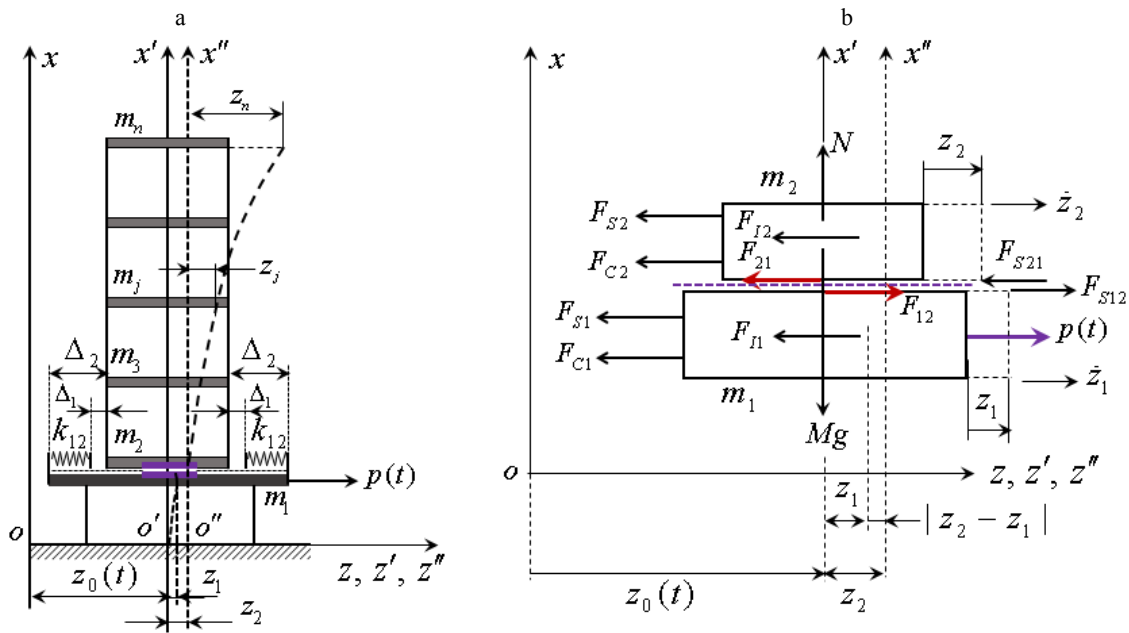


Рис. 1. Модель здания с сейсмоизолирующим поясом (а) и сила трения скольжения (б)

Fig. 1. Model of a building with a seismic-isolating belt (a) and the sliding friction force (b)

В момент времени, когда абсолютная величина относительного смещения при скольжении $|z_2 - z_1|$ становится больше Δ_1 , но при этом остается меньше Δ_2 , в работу включаются упругие демпферы с коэффициентом жесткости k_{12} .

Следовательно, при выполнении условий $\Delta_1 < |z_2 - z_1| \leq \Delta_2$ в уравнениях равновесия масс m_1 и m_2 , помимо сил инерции F_I , затухания F_C , упругости F_S , трения F_{I2} , входит сила упругости ограничителя F_{S12} . Исходя из условий динамического равновесия масс m_1 и m_2 при скольжении (рис. 1b) в соответствии с принципом Даламбера получим:

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} + F_{I2} + F_{S12} + p(t) = 0; \quad (1)$$

$$-F_{I2} - F_{C2} - F_{S2} - F_{21} - F_{S21} = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } F_{I1} = m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_0); \quad F_{C1} = c_1\dot{z}_1; \quad F_{S1} = r_{11}z_1; \quad (3)$$

$$F_{I2} = m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_0); \quad F_{C2} = c_2\dot{z}_2;$$

$$F_{S2} = r_{22}z_2 + r_{23}z_3; \quad (4)$$

$$F_{I2} = F_{21} = F_F \operatorname{sgn}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1); \quad F_F = \mu N; \\ N = Mg; \quad M = m_2 + m_3 + \dots + m_n; \quad (5)$$

$$F_{S12} = F_{S21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1) \operatorname{sgn}(z_2 - z_1) = \\ = F_R \operatorname{sgn}(z_2 - z_1); \quad (6)$$

$$F_R = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1);$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1;$$

$$\operatorname{sgn}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = \operatorname{sgn}(v_{21}) = \begin{cases} 1, & v_{21} > 0; \\ 0, & v_{21} = 0; \\ -1, & v_{21} < 0; \end{cases} \quad (7)$$

μ – коэффициент трения скольжения; N – сила реакции опоры; c_j – коэффициенты затухания; F_F – сила трения скольжения; M – суммарная масса здания; v_{21} – разность скоростей движения массы m_1 и m_2 .

Для остальных степеней свободы уравнения динамического равновесия записываются в виде:

$$F_{I3} + F_{C3} + F_{S3} = 0; \quad (8)$$

$$\dots \dots \dots F_{In} + F_{Cn} + F_{Sn} = 0. \quad (9)$$

Внося (3)–(7) в (1), (2), (8) и (9), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$m_1\ddot{z}_1 + c_1\dot{z}_1 + r_{11}z_1 - F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) - \\ - F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) = -m_1\ddot{z}_0(t) + p(t); \quad (10)$$

$$m_2\ddot{z}_2 + c_2\dot{z}_2 + r_{22}z_2 + r_{23}z_3 + F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) + \\ + F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) = -m_2\ddot{z}_0(t); \quad (11)$$

$$m_i\ddot{z}_i + c_i\dot{z}_i + \sum_{j=2}^n r_{ij}z_j = -m_i(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \\ i = 3, 4, \dots, n; \quad (12)$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1; \quad z_{21} = z_2 - z_1;$$

$$F_R = k_{02}(|z_{21}| - \Delta_1),$$

где r_{ij} – реакция, возникающая в i -й связи основной системы метода перемещений при единичном перемещении связи j ; c_j – коэффициент затухания.

Очевидно, что при условии $|z_2 - z_1| \leq \Delta_1$ реакция упругого ограничителя равняется нулю $F_R = 0$, а при условии $|z_2 - z_1| \geq \Delta_2$ в работу включаются жесткие упоры и движение системы прекращается.

Если модуль относительного смещения $|z_{21}| \neq 0$, то скольжение надземных конструкций относительно фундамента возможно в том случае, когда сумма сил, действующих на массы $m_2, m_3, \dots, m_n$, больше силы трения скольжения [1]:

$$|F_\Sigma| - F_F \geq F_1; \quad (13)$$

$$F_\Sigma = F_{It} + F_{It+\Delta t} + F_R \operatorname{sgn}(z_{21});$$

$$F_{It} = m_2 \ddot{z}_2(t) + \sum_{j=3}^n m_j [\ddot{z}_j(t) + \ddot{z}_2(t)];$$

$$F_{It+\Delta t} = \left(m_2 + \sum_{j=3}^n m_j \right) \ddot{z}_0(t + \Delta t);$$

$$F_F = \mu(m_2 + m_3 + \dots + m_n)g,$$

где F_1 – заданное минимальное значение силы инерции, при которой происходит скольжение массы m_2 относительно m_1 .

Применяя метод последовательной аппроксимации по времени (Низомов, 2000), где ускорение и скорость в момент времени t_i определяются по формулам:

$$\ddot{z}_i = \frac{\alpha_1}{\tau^2}(z_i - z_{i-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_{i-1} - \alpha_3 \ddot{z}_{i-1}; \quad (14)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\beta_1}{\tau}(z_i - z_{i-1}) - \beta_2 \dot{z}_{i-1} - \tau \beta_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (15)$$

из (10)–(12) получим систему алгебраических уравнений:

$$r_{11}^* z_1 = m_1 u_1 + c_1 v_1 + F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) + F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t);$$

$$r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 u_2 + c_2 v_2 - F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) - F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) - m_2 \ddot{z}_0(t);$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 u_3 + c_3 v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2); \quad (16)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 u_4 + c_4 v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2);$$

...

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n u_n + c_n v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2);$$

$$r_{jj}^* = \left(m_j \frac{\alpha_1}{\tau^2} + c_j \frac{\beta_1}{\tau} + r_{jj} \right); \quad (17)$$

$$u_j = \frac{\alpha_1}{\tau^2} z_j + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_j + \alpha_3 \ddot{z}_j; \quad (18)$$

$$v_j = \frac{\beta_1}{\tau} z_j + \beta_2 \dot{z}_j + \beta_3 \ddot{z}_j; \quad (19)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Если перемещения $z_1, \dots, z_n$ в левой части системы (16) соответствуют моменту времени t_k , то u_j, v_j – ускорения и скорость массы m_j соответствуют предыдущему моменту времени $t_k - \tau$. Этому же моменту времени соответствуют сила трения и сила упругости ограничителя, входящие в правую часть первых двух уравнений системы (16). При этом заданные функции $\ddot{z}_0(t)$ и $p(t)$ соответствуют моменту времени t_k .

В случае, когда скользящая плоскость расположена на уровне фундаментной плиты (рис. 2), или если предположить, что жесткости стоек виброплатформы (рис. 1) стремятся к бесконечности, уравнение динамического равновесия массы m_1 (рис. 2b) представляется в виде

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} - F_{I0} - F_{S01} + p(t) = 0, \quad (20)$$

$$\text{где } F_{I1} = m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad F_{C1} = c_1 \dot{z}_1; \quad F_{S1} = r_{11} z_1 + r_{12} z_2;$$

$$F_{I0} = F_F \operatorname{sgn}(v_1);$$

$$F_{S01} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1) \operatorname{sgn}(z_1) = F_R \operatorname{sgn}(z_1);$$

$$F_F = \mu M g; \quad (21)$$

$$F_R = k_{01}(|z_1| - \Delta_1),$$

v_1 – скорость движения массы m_1 .

Уравнение (20) с учетом (21) приобретает вид

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + F_F \operatorname{sgn}(v_1) + F_R \operatorname{sgn}(z_1) = -m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t). \quad (22)$$

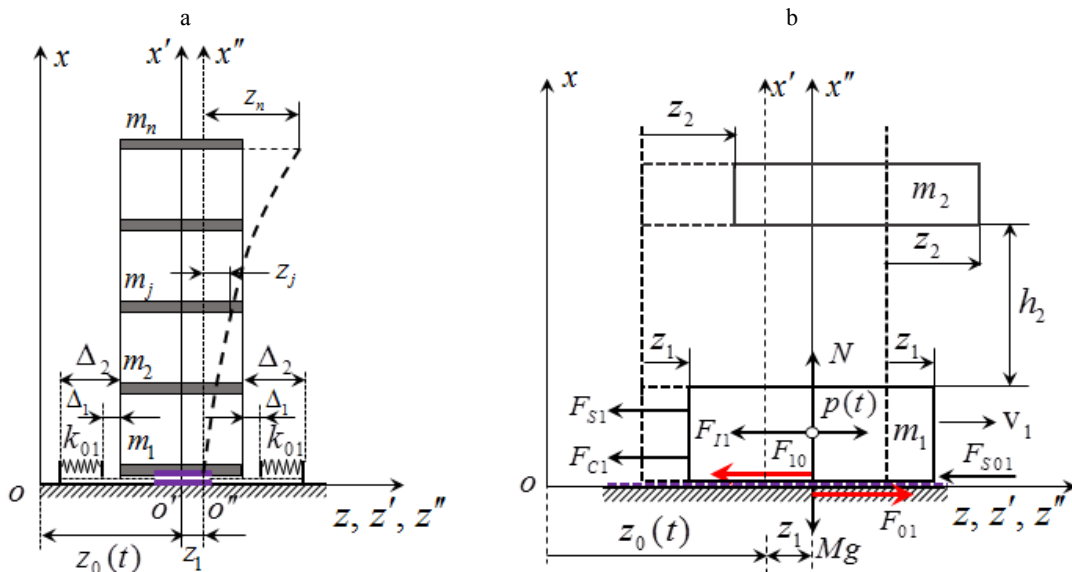


Рис. 2. Модель здания со скользящим поясом на уровне фундаментной плиты

Fig. 2. Model of a building with a sliding belt at the level of the foundation slab

Уравнения движений остальных масс модели, представленной на рис. 2а, записываются в общем виде:

$$m_j \ddot{z}_j + c_j \dot{z}_j + r_{j,j-1} z_{j-1} + r_{jj} z_j + r_{j,j+1} z_{j+1} = -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad (23)$$

$$j = 2, 3, \dots, n-1;$$

$$m_n \ddot{z}_n + c_n \dot{z}_n + r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn} z_n = -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1). \quad (24)$$

Подставив (14) и (15) в (22)–(24), получим систему уравнений, которая представляется в виде:

$$r_{11}^* z_1 + r_{12} z_2 = m_1 u_1 + c_1 v_1 - p v_1 - p z_1 - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t);$$

$$p v_1 = F_F \operatorname{sgn}(v_1); \quad p z_1 = F_R \operatorname{sgn}(z_1);$$

$$r_{21} z_1 + r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 u_2 + c_2 v_2 - m_2 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1);$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 u_3 + c_3 v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad (25)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 u_4 + c_4 v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1);$$

$$\dots$$

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n u_n + c_n v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1).$$

По известным значениям $u, v, p v, p z$ в момент времени $t_{n-1} = (n-1)\tau$ и заданным значениям $\ddot{z}_0, p$ в момент времени $t_n = n\tau$, из реше-

ния системы уравнений (25) определяются вектор перемещений, соответствующий моменту времени $t_n = n\tau$, а затем для этого же момента времени по формулам (14), (15) вычисляются скорости $\dot{z}$ и ускорений $\ddot{z}$.

По найденным значениям перемещений, скоростей и ускорений формируются векторы правой части с компонентами $u, v, p v, p z$, соответствующие моменту времени $t_n = n\tau$. Далее решается система уравнений и определяются перемещения, соответствующие моменту времени $t_n = (n+1)\tau$ и т. д.

Уравнения (16) и (25) можно представить в матричной форме:

$$\mathbf{R}^* \mathbf{Z}_k = \mathbf{B}_k; \quad (26)$$

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} + \mathbf{R}_1; \quad \mathbf{R}_1 = \operatorname{diag}(\kappa_1 \quad \kappa_2 \quad \dots \quad \kappa_n);$$

$$\kappa_j = \alpha_1 m_j / \tau^2 + \beta_1 c_j / \tau, \quad (27)$$

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{M} \mathbf{U}_{k-1}^* + \mathbf{C} \mathbf{V}_{k-1}^* + \mathbf{F}_{k-1} - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} + \mathbf{P}_k; \quad (28)$$

$$\mathbf{U}_{k-1}^* = \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{Z}_{k-1} + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (29)$$

$$\mathbf{V}_{k-1}^* = \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{Z}_{k-1} + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (30)$$

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} = \mathbf{I} \ddot{\mathbf{z}}_0(t_k); \quad \mathbf{P}_n = \{p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_n\}_k^T; \quad (31)$$

$$\mathbf{F}_{k-1} = \mathbf{F}_{1,k-1} + \mathbf{F}_{2,k-1};$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Векторы силы трения-скольжения для моделей, показанных на рис. 1, 2, соответственно записываются в виде:

$$\mathbf{F}_{1,k-1} = \mu Q_1 \{ \text{sgn}(v_{21}) \quad -\text{sgn}(v_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (32)$$

$$\mathbf{F}_{1,k-1} = \mu Q_2 \{ -\text{sgn}(v_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (33)$$

где $v_{21} = v_2 - v_1$ – разность скоростей движения масс m_2 и m_1 , например, если $v_{21} > 0$, то $\text{sgn}(v_{21}) = 1$. Из (32) следует, что на массы m_2 и m_1 при других равных условиях действуют равные силы, но противоположенные по направлению. Сила трения в (33), соответствующая модели, представленной на рис. 2, зависит только от скорости движения массы m_1 относительно основания – v_1 . Векторы силы упругой реакции ограничителей для моделей, представленных на рис. 1 и 2, записываются в виде:

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{21} \{ \text{sgn}(z_{21}) \quad -\text{sgn}(z_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (34)$$

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{10} \cdot \{ -\text{sgn}(z_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (35)$$

$$F_{21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1); \quad F_{10} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1),$$

где $z_{21} = z_2 - z_1$ – разность относительных перемещений масс m_2 и m_1 для модели здания, установленной на виброплатформе (рис. 1), при условии $|z_{21}| \leq \Delta_1$; $F_{21} = 0$.

Сила упругой реакции F_{10} в (35) модели, представленной на рис. 2, также будет равняться нулю, если $|z_1| \leq \Delta_1$. Следовательно, в случае, когда модули z_{21} и z_1 становятся больше заданной величины Δ_1 , в правой части системы уравнений появляется дополнительная сила.

Векторы относительных ускорений и скоростей, полученных путем последовательных аппроксимаций, представляются в виде:

$$\mathbf{U}_k = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (36)$$

$$\mathbf{V}_k = \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (37)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Вектор полных ускорений определяется как сумма векторов

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{U}_k + \mathbf{I} \ddot{\mathbf{z}}_{0,k}, \quad (38)$$

где $\mathbf{I}$ – единичный вектор-столбец; $\ddot{\mathbf{z}}_{0,k}$ – ускорение основания, соответствующее моменту времени t_k .

Векторы-столбцы инерционных и упругих сил, а также изгибающий момент и поперечная сила в опорной части модели, соответствующие моменту времени t_k , могут быть представлены так:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{M} \mathbf{U}_k; \quad \mathbf{Q}_k = \mathbf{R} \mathbf{Z}_k; \quad M_{0,k} = \mathbf{X} \mathbf{S}_k; \quad Q_{0,k} = \mathbf{e} \mathbf{S}_k; \quad (39)$$

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n) \quad \mathbf{e} = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1),$$

где $\mathbf{X}$ – вектор-строка координат точек приложения сосредоточенных масс; $\mathbf{e}$ – единичный вектор-строка.

Алгоритм (26)–(39) реализован на различных примерах по расчету модели зданий со скользящим поясом.

Пример 1. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа – модель здания». Рассмотрим систему с четырьмя степенями свободы при отсутствии скольжения (рис. 3), где $m_1 = m_1^*$ состоит из суммы двух масс – массы стола виброплатформы и массы конструкции опорной части модели. Эти массы находятся в состоянии «залипания». Вибростол массой $1,223 \text{ тс}^2/\text{м}$ опирается на четыре стойки высотой $h_1 = 0,435 \text{ м}$, сечением $10 \times 5 \text{ см}$, модуль упругости материала $E_1 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ т/м}^2$. Модель фрагмента каркасного здания состоит из сетки колонн $d \times 3d$, где $d = 1,5 \text{ м}$, и следующих данных: сечение колонн $10 \times 10 \text{ см}$; сечение ригелей $10 \times 5 \text{ см}$; толщина плиты 4 см ; высота этажей $h_2 = h_3 = h_4 = 0,75 \text{ м}$; модуль упругости материала $E_2 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$. Коэффициент жесткости стоек вибростола $k_1 = 4 \cdot 12 E_1 I_1 / h_1^3 = 0,13 \cdot 10^5 \text{ т/м}$. Коэффициенты жесткости стоек модели зда-

ния $k_2 = k_3 = k_4 = 8 \cdot 12 E_2 I_2 / h_2^3 = 0,95 \cdot 10^3$. Сосредоточенные массы имеют следующие значения: $m_1 = m_1^* = 1,256$, $m_2 = m_3 = 0,103$, $m_4 = 0,096$ тс²/м. Параметр затухания принят равным $\xi = 0,05$. Шаг по времени принят равным $\tau = 0,002$ с.

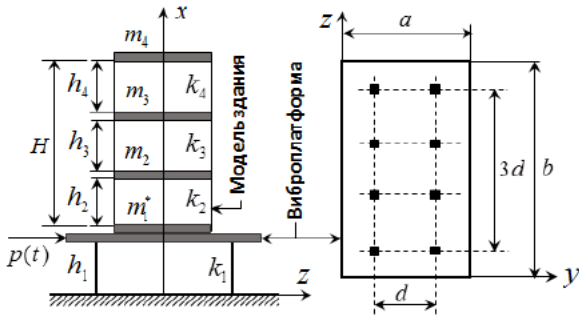


Рис. 3. Система «виброплатформа – модель здания»

Fig. 3. The “vibration platform – building model” system

На рис. 4 приведены графики свободных колебаний системы от действия мгновенного

импульса. При этом предполагается, что все массы исследуемого объекта приобретают одинаковую начальную скорость, равную $v_{01} = \dots = v_{04} = 0,1$ м/с. Можно заметить, что график колебания виброплатформы имеет простой затухающий гармонический характер с периодом $T = 0,063$ с. Колебания модели, например z_4 , происходят со значительно большей амплитудой и основным периодом свободных колебаний $T = 0,128$ с. По-видимому, это объясняется тем, что рассматриваемая система состоит из жесткой и массивной платформы и относительно гибкой модели.

На рис. 5 представлены графики изменения ускорений и сил инерции, полученных от действия мгновенного импульса. Видно, что ускорения масс m_4 и m_1 незначительно отличаются друг от друга, но силы инерции в них значительно отличаются.

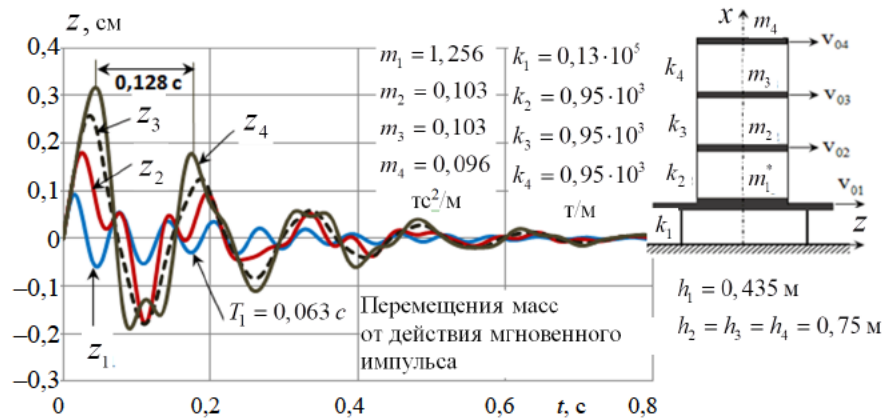


Рис. 4. Свободные колебания системы

Fig. 4. Free oscillations of the system

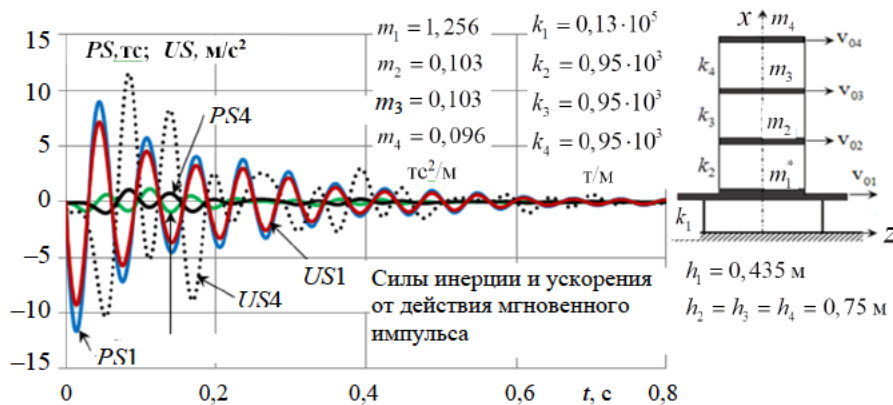


Рис. 5. Графики изменения ускорений и сил инерции в системе

Fig. 5. Graphs of changes in accelerations and inertial forces in the system

Пример 2. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа – модель здания» с учетом скольжения при исходных данных, приведенных в примере 1. Предполагается, что плоскость скольжения расположена между массами m_1 и m_2 , где $m_1 = 1,223$; $m_2 = 0,033$ тс²/м. В этой модели также рассматриваются действия мгновенного импульса, в результате которого все массы получают одинаковую начальную скорость, равную $v_0 = 0,1$ м/с, независимо от величин сосредоточенных масс. На рис. 6 приведены графики свободных колебаний системы, полученных от начальной скорости при различных значениях массы платформы. Результаты получены при коэффициенте трения $\mu = 0,1$ и параметре затухания $\xi = 0,05$. Кривые 1, 2, 3 получены при массе

платформы $m_1 = 1,223$ тс²/м, а кривые 4, 5, 6 – при $m_1 = 0,1223$ тс²/м. Здесь видно, что платформа (кривые 1 и 4) колеблется практически также, как в первой модели (пример 1). Что касается колебания модели, то она перемещается вправо на величину более 6 мм, а затем совершает колебательные движения с такой же частотой, как и платформа.

На рис. 7 показаны графики изменения ускорений массы m_1 , m_2 и m_5 системы, полученные от заданной начальной скорости, где вес платформы $Q_p = 12$ т. Аналогичные результаты получены и при $Q_p = 1,2$ т (рис. 8). Сравнение показывает, что уменьшение массы платформы приводит к значительному изменению ускорений платформы и модели.

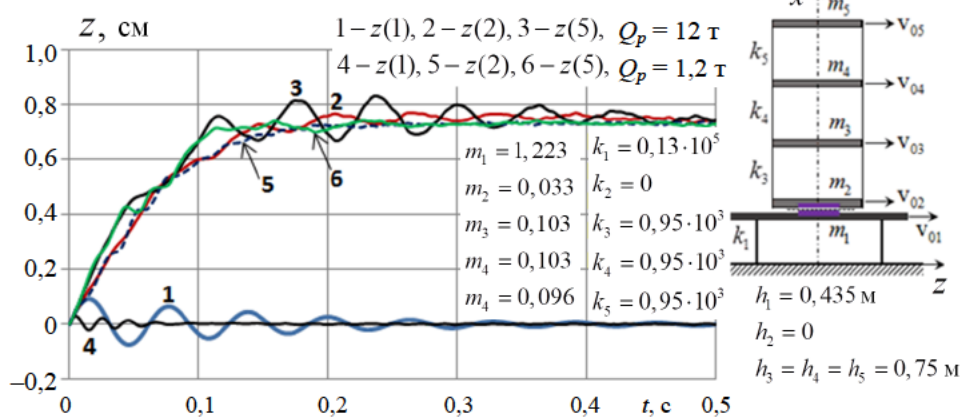


Рис. 6. Графики изменения перемещений

Fig. 6. Graphs of changes in displacements

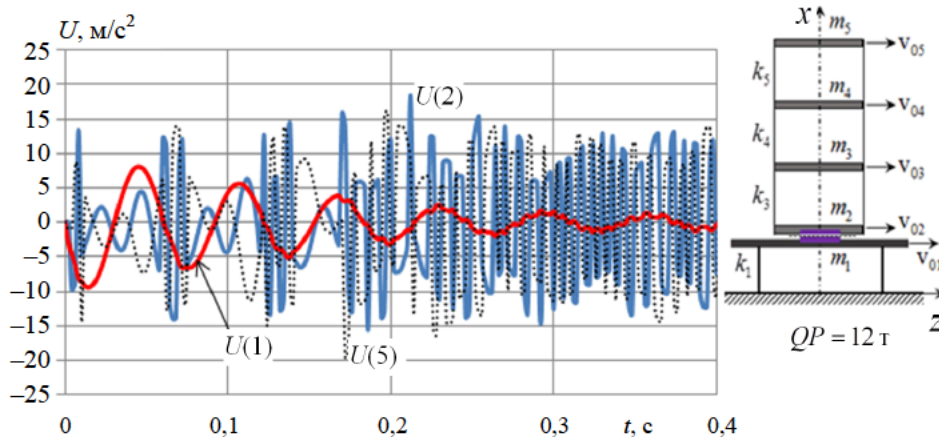


Рис. 7. Графики ускорений и сил инерции

Fig. 7. Acceleration and inertial force graphs

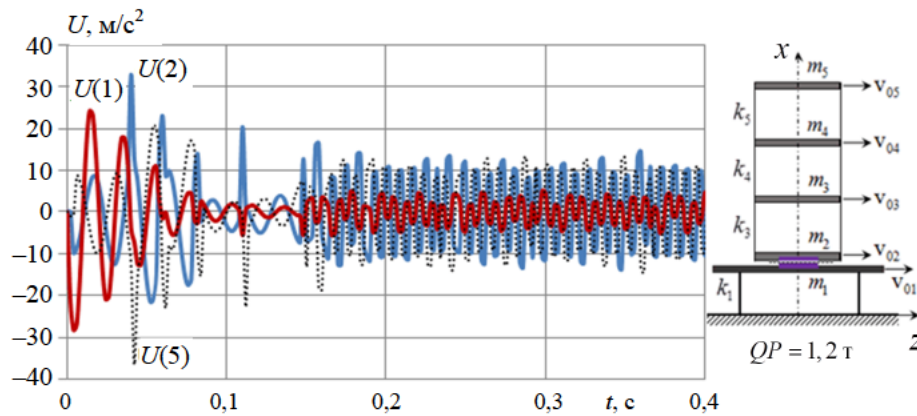


Рис. 8. Графики ускорений и сил инерции

Fig. 8. Acceleration and inertial force graphs

ВЫВОД

На основе разработанных алгоритмов и компьютерных программ получены результаты численного решения динамической задачи модели здания при различных граничных условиях и воздействиях. Свободные колебания модели в состоянии «залипания» с виброплатформой происходят с основным периодом $T = 0,128$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурашидов, К. С. Сейсмостойкость сооружений / К. С. Абдурашидов, Я. М. Айзенберг, Т. Ж. Жунусов [и др.]. М.: Наука, 1989. 192 с.
2. Аубакиров, А. Т. Реакция зданий на свайных фундаментах с элементами сухого трения на воздействие реальных акселерограмм / А. Т. Аубакиров, С. Е. Ержанов // Совершенствование методов расчета и проектирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах: материалы Всесоюзного совещания. Алма-Ата, 1976. С. 12–19.
3. Низомов, Д. Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики / Д. Н. Низомов. М.: АСВ, 2000. 283 с.
4. Низомов, Д. Н. Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с сухим трением / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, И. И. Каландарбеков // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2018. Т. 61, № 1. С. 47–53.
5. Каландарбеков, И. К. Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях / И. К. Каландарбеков, Д. Н. Низомов, И. И. Каландарбеков // Известия Академии наук Республики Таджикистан. 2016. № 4 (165). С. 58–64.
6. Патент Республики Таджикистан № 78. Компьютерная программа численного решения динамической задачи сейсмоизолированного здания со скользящим поясом: опубл. 11.03.2019 / Низомов Д. Н., Каландарбеков И. К., Каландарбеков И. И.
7. Павлык, В. Г. Принцип проектирования сейсмостойких зданий с повышенными диссипативными свойствами / В. Г. Павлык // Материалы Всесоюзного совещания по проектированию и строительству сейсмостойких зданий и сооружений. Фрунзе, 1971. С. 210–218.
8. Экспериментальное исследование здания на сейсмоизолирующих опорах при действии динамических нагрузок (Япония) // Экспресс-Информ / ВНИИИС. Москва, 1984. Вып. 17. С. 8–10. (Сер.14, Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство).
9. A Construction Method Providing High Earthquake-Resistance in Reinforced Concrete Building / O. Pekin, F. Sirmalifl, K. Özdenll, P. Rani. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6_vol2_2064.pdf.
10. Абрамов, Б. М. Динамический гаситель колебаний, вызываемых периодическими ударами / Б. М. Абрамов, А. Б. Абрамов // Механика машин: сб. ст. Тбилиси: Мецниереба, 1969. Вып. 20. С. 103–117.
11. Алексеев, А. М. О демпфировании колебаний импульсно-динамическим гасителем / А. М. Алексеев // Проблемы прочности. 1972. № 2. С. 52–54.
12. Джинчвелашвили, Г. А. Эффективность применения сейсмоизолирующих опор при строительстве зданий и сооружений / Г. А. Джинчвелашвили, О. В. Мкртычев // Транспортное строительство. 2003. № 9. С. 15–19.
13. Савинов, О. А. Сейсмоизоляция сооружений / О. А. Савинов // Динамические проблемы строительной техники: избранные статьи и доклады. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. С. 155–178.
14. Савинов, О. А. О некоторых особенностях применения систем сейсмоизоляции зданий и сооружений / О. А. Савинов, Т. А. Сандович // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева: сб. науч. трудов. Л.: Энергоатомиздат, 1982. Т. 161. С. 26–39.

Поступила 31.10.2024

Подписана в печать 09.01.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Abdurashidov K. S., Isenberg Ya. M., Zhunusov T. Zh., Skladnev N. N. (1989) *Seismic Resistance of Structures*. Moscow, Nauka Publ. 192 (in Russian).
2. Aubakirov A. T., Erzhanov S. E. (1976) Response of Buildings on Pile Foundations with Dry Friction Elements to the Impact of Real Accelerograms. *Sovershenstvovanie metodov rascheta i konstruirovaniya zdaniy i sooruzheniy, vozvodimyykh v seismicheskikh raionakh: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya* [Improving Methods of Calculation and Design of Buildings and Structures Erected in Seismic Areas: Proceedings of All-Union Conference]. Alma-Ata, 12–19 (in Russian).
3. Nizomov D. N. (2000) *The Method of Boundary Equations in Solving Static and Dynamic Problems of Structural Mechanics*. Moscow, ASB Publ. 283 (in Russian).
4. Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2018) Numerical Modeling of Seismically Isolated Buildings with Dry Friction. *Doklady Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 61 (1), 47–53 (in Russian).
5. Kalandarbekov I. K., Nizomov D. N., Kalandarbekov I. I. (2016) Comparative Analysis of Different Types of Seismic Isolation in Multi-Story Buildings. *Izvestiya Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan* [Proceedings the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], (4), 58–64 (in Russian).
6. Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2019) *Computer Program for Numerical Solution of Dynamic Problem of Seismically Isolated Building with Sliding Belt*. Patent Republic of Tajikistan No 78 (in Russian).
7. Pavlyk V. G. (1971) Design Principle of Earthquake-Resistant Buildings with Increased Dissipative Properties. Proceedings of the All-Union Conference on the Design and Construction of Earthquake-Resistant Buildings and Structures. Frunze, 210–218 (in Russian).
8. Experimental Study of a Building on Seismic Isolating Supports under Dynamic Loads (Japan). *Express-Inform. Series 14, Construction in special conditions. Earthquake-resistant construction*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Certification, Is. 17, 8–10 (in Russian).
9. Pekin O., Sirmalifl F., Özdenll K., Rani P. A Construction Method Providing High Earthquake-Resistance in Reinforced Concrete Building. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6_vol2_2064.pdf.
10. Abramov B. M., Abramov A. B. (1969) Dynamic Damper for Vibrations Caused by Periodic Impacts. *Mekhanika Mashin: sb. st. [Machine Mechanics: Collection of Articles]*. Tbilisi: Metsniereba, Is. 20, 103–117 (in Russian).
11. Alekseev A. M. (1972) Oscillation Damping by Pulsed Dynamic Dampers. *Strength of Materials*, 4 (2), 179–181. <https://doi.org/10.1007/bf01527575>.
12. Dzhinchvelashvili G. A., Mkrttychev O. V. (2003) Efficiency of Using Seismic Isolation Supports in the Construction of Buildings and Structures. *Transportnoe Stroitelstvo = Transport Construction*, (9), 15–19 (in Russian).
13. Savinov O. A. (1993) Seismic Isolation of Structures. *Dinamicheskie Problemy Stroitelnoy Mekhaniki. Izbrannye Statyi i Doklady* [Dynamic Problems of Structural Mechanics. Selected Articles and Reports]. Saint-Petersburg, Vedeneev VNIIG, 155–178 (in Russian).
14. Savinov O. A., Sandovich T. A. (1982) On Some Features of the Application of Seismic Isolation Systems for Buildings and Structures. *Izvestiya VNIIG imeni B. E. Vedeneeva: sb. nauch. Trudov* [News of All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneev: Collection of Scientific Works]. Leningrad, Energoatomizdat Publ. Vol. 161, 26–39 (in Russian).

Received: 31.10.2024

Accepted: 09.01.2025

Published online: 31.07.2025