

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.042.8

М.В. ВОЛКОВА, Ю.Т. ЧЕРНОВ, Д. КБЕЙЛИ

РАСЧЕТ МАССИВНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, ЗАГЛУБЛЕННЫХ В ГРУНТ, ПОД ВИБРОИЗОЛИРОВАННОЕ И НЕВИБРОИЗОЛИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Рассмотрен метод расчета горизонтально-вращательных колебаний массивных фундаментов, заглубленных в грунт, на нагрузки, возбуждаемые виброактивным оборудованием. Метод, предложенный проф. Ю.Т. Черновым, основан на связи передаточных и импульсных переходных функций. Фундамент моделируется как система с тремя степенями свободы (горизонтальное, вертикальное смещения и угол поворота). Грунт представлен как упругое основание. Жесткостные характеристики системы определены как силы реакции грунтового основания при единичном смещении фундамента. Приведены два примера расчета: 1) фундамент под неvíброизолированное оборудование; 2) фундамент под виброизолированное оборудование. Показано, что при использовании виброизоляции оборудования перемещения массивного фундамента снизились в 5–6 раз, поэтому нагрузки на фундамент уменьшились, что могло бы снизить стоимость фундамента. Представленный метод может быть использован для широкого класса задач, в частности, при оценке влияния перемещений фундамента на величины сейсмических сил.

Ключевые слова: виброактивное оборудование, виброизолированный фундамент, массивные фундаменты, импульсные переходные функции, передаточные функции, виброизоляция.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-739-7-5-12

Массивные фундаменты, заглубленные в грунт, во многих случаях могут быть удачным вариантом при установке оборудования с динамическими нагрузками [1, 2], так как они повышают жесткость системы и соответственно снижают уровни горизонтально-вращательных колебаний и в случае необходимости уменьшают высоту расположенного на площадке оборудования. Кроме того, целесообразно применять виброизоляцию для уменьшения нагрузок, передающихся на основание [3]. Обычно систему оборудование–фундамент моделируют, используя систему с несколькими степенями свободы [4]. Кроме того, параметры колебаний фундаментов от динамических нагрузок напрямую зависят от параметров жесткости и демпфирования основания [5].

© Волкова М.В., Чернов Ю.Т., Кбейли Д., 2020

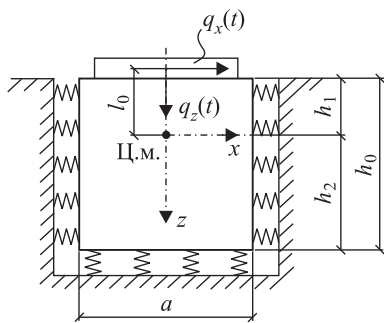


Рис. 1. Расчетная схема горизонтально-вращательных колебаний массивного фундамента, заглубленного в грунт

Сначала приведем общую схему расчета фундаментов, заглубленных в грунт, для наиболее общего случая возможных воздействий – под оборудование с вращающимися частями. Основная расчетная схема и принятые условные обозначения представлены на рис. 1.

Если центр масс системы лежит на оси симметрии реакций грунтового основания, система уравнений движения распадается на вертикальные и горизонтально-вращательные колебания.

Б.Г. Алексеев [6] и А.Д. Кондин [7] предложили зависимость для учета дополнительных жесткостей от грунтовой засыпки при вертикальных колебаниях:

$$K_z = 0,33LA_3, \quad (1)$$

где $L = 0,3c_z$ – коэффициент упругого равномерного сдвига засыпки;

c_z – коэффициент постели грунта;

$A_3 = 2(a + b)h_0$ – площадь засыпки по боковым граням (размеры фундамента в плане $a \times b$).

Уравнение вертикальных колебаний плоского массивного тела [8]:

$$m\ddot{s}_z + K_z s_z = q_z(t), \quad (2)$$

где m – общая масса фундамента и оборудования:

$$m = m_{\phi} + m_{об}, \quad (3)$$

где m_{ϕ} – масса фундамента;

$m_{об}$ – масса оборудования;

s_z – вертикальное смещение центра масс;

K_z – жесткостная характеристика системы;

$q_z(t)$ – вертикальная составляющая нагрузки.

Реакции грунта при вертикальном смещении фундамента (рис. 2) определяются по формулам:

$$R_z = c_z abs_z; \quad R_{z6} = c_{z6} h_0 bs_z, \quad (4)$$

где c_z – коэффициент упругого равномерного сжатия по нижней грани;

c_{z6} – коэффициент упругого равномерного сдвига по боковой грани.

Тогда жесткостная характеристика системы определяется зависимостью:

$$K_z = (R_z + 2R_{z6})/s_z = b(c_z a + 2c_{z6} h_0). \quad (5)$$

Используя метод, разработанный в [8], основанный на связи передаточных [9] и

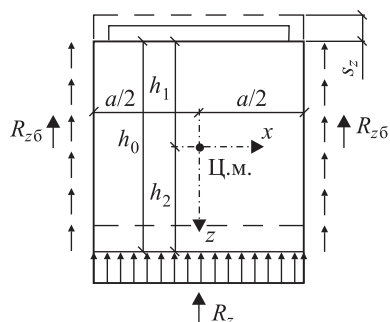


Рис. 2. Реакции в системе при вертикальном смещении фундамента вниз

импульсных переходных функций, получим формулу для переходной функции:

$$\overline{H_z}(\omega) = \frac{1}{mp_z^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{p_z^2} + i2\nu\omega \right)}, \quad (6)$$

где $p_z^2 = K_z / m$ – частота собственных колебаний системы;

ω – круговая частота внешнего воздействия;

ν – коэффициент диссипации [10].

Формула импульсной переходной функции для вертикальных колебаний [8]:

$$k_z(t) = \frac{e^{-\nu p_z^* t}}{mp_z^*} \sin p_z^* t, \quad (7)$$

где $p_z^* = p_z \sqrt{1 - (\nu p_z)^2}$ – частота собственных колебаний с учетом затухания [10].

Система горизонтально-вращательных колебаний плоского массивного тела:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + K_x x_1 - K_{x\phi} x_2 = q_1(t), \\ m\rho_y^2 \ddot{x}_2 - K_{x\phi} x_1 + K_\phi x_2 = q_2(t), \end{cases} \quad (8)$$

где $x_1 = s_x$ и $x_2 = \phi$ – соответственно горизонтальное смещение центра масс и угол поворота объекта относительно оси ou (ось ou направлена из плоскости рисунка);

$K_x, K_{x\phi}, K_\phi$ – жесткостные характеристики системы;

$q_1(t) = q_x(t)$ – горизонтальная составляющая нагрузки (стоит отметить, что нагрузки $q_x(t)$ и $q_z(t)$ имеют сдвиг по фазе в четверть периода);

$q_2(t) = q_x(t)l_0 + M_y(t)$ – момент внешних сил относительно оси ou ;

l_0 – эксцентриситет горизонтальной составляющей нагрузки относительно центра масс;

$M_y(t)$ – дополнительный момент внешних сил относительно оси ou ;

ρ_y – радиус инерции объекта относительно оси ou , определяемый по формуле

$$\rho_y = \sqrt{\frac{J_y}{m}}, \quad (9)$$

где J_y – момент инерции системы относительно оси ou :

$$J_y = m_\phi \left[\frac{h_0^2 + a^2}{12} + \left(h_2 - \frac{h_0}{2} \right)^2 \right] + m_{об} l_0^2. \quad (10)$$

Реакции грунта при горизонтальном смещении (рис. 3, а) и угле поворота (рис. 3, б) фундамента определяются по формулам:

$$R_x = c_x abs_x; \quad R_{x\phi} = c_{x\phi} h_0 bs_x; \quad R_{\phi} = c_{\phi} h_2 ba \phi; \quad (11)$$

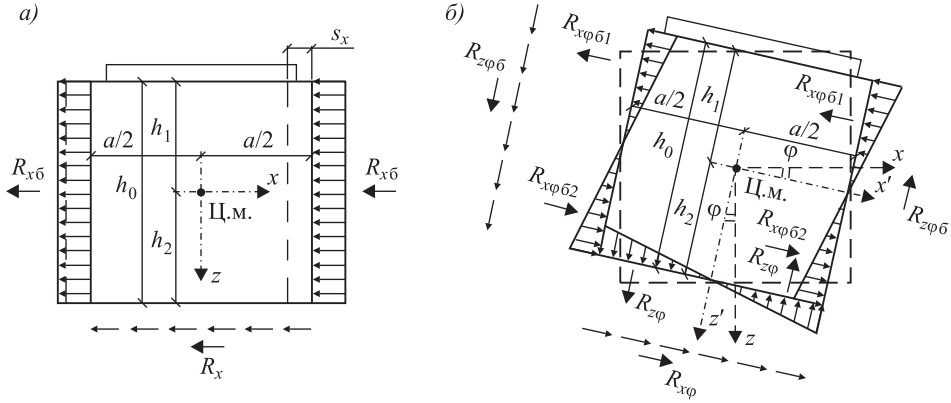


Рис. 3. Реакции в системе: при горизонтальном смещении фундамента вправо (а); при повороте фундамента по часовой стрелке (б)

$$R_{x\phi b1(2)} = c_{x\phi b} h_{1(2)}^2 b \phi / 2; \quad R_{z\phi} = c_{z\phi} a^2 b \phi / 8; \quad R_{z\phi b} = c_{z\phi b} a h_0 b \phi / 2, \quad (12)$$

где $c_{z\phi}$ – коэффициент упругого неравномерного сжатия по нижней грани;
 c_x – коэффициент упругого равномерного сдвига по нижней грани;
 $c_{x\phi}$ – коэффициент упругого неравномерного сдвига по нижней грани;
 $c_{x\phi b}$ – коэффициент упругого равномерного сжатия по боковой грани;
 $c_{x\phi b}$ – коэффициент упругого неравномерного сжатия по боковой грани;
 $c_{z\phi b}$ – коэффициент упругого неравномерного сдвига по боковой грани.

Тогда жесткостные характеристики системы определяются зависимостями:

$$K_x = (R_x + 2R_{x\phi}) / s_x = b(c_x a + 2c_{x\phi} h_0); \quad (13)$$

$$K_{x\phi} = (R_{x\phi} + 2(R_{x\phi b2} - R_{x\phi b1})) / \phi = b(c_{x\phi} h_2 a + c_{x\phi b} (h_2^2 - h_1^2)); \quad (14)$$

$$K_\phi = \left(R_{x\phi} h_2 + 2 \left[R_{z\phi} \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{2} + \frac{2}{3} (R_{x\phi b1} h_1 + R_{x\phi b2} h_2) + R_{z\phi b} \frac{a}{2} \right] \right) / \phi = \\ = b[c_{x\phi} h_2^2 a + c_{z\phi} a^3 / 12 + 2c_{x\phi b} (h_1^3 + h_2^3) / 3 + c_{z\phi b} a^2 h_0 / 2]. \quad (15)$$

Формулы для импульсных переходных функций:

$$k_{ij}(t) = 1/B \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} T_{ij}(p_r^2) e^{-v_r p_r^2 t} \sin p_r^* t / p_r^*; \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

$$\text{где } B = m^2 \rho_y^2 (p_2^2 - p_1^2); \quad (17)$$

$$T_{11}(p_r^2) = K_\phi + K_{x\phi} l_0 - m \rho_y^2 p_r^2; \quad T_{21}(p_r^2) = K_{x\phi} + l_0 (K_x - m p_r^2); \quad (18)$$

$$T_{12}(p_r^2) = K_{x\phi}; \quad T_{22}(p_r^2) = K_x - m p_r^2; \quad (19)$$

p_r^* – как в формуле (7).

Перемещения в системе от действия произвольных нагрузок определяются по формуле [8]:

$$x_i(t) = \int_0^t [q_1(\tau) k_{i1}(t-\tau) + M_y(\tau) k_{i2}(t-\tau)] d\tau, \quad i = 1..2; \quad (20)$$

импульсные переходные функции $k_{ij}(t)$ – по формуле (16).

Как пример приведем расчет горизонтально-вращательных колебаний массивного фундамента под виброактивное оборудование с вращающимися частями.

Размеры массивного фундамента примем равными: $h_0 = 1,5$ м; $h_1 = 0,5$ м; $h_2 = 1,0$ м; $a = b = 2,0$ м; расстояние от точки приложения силы до центра масс $l_0 = 1,5$ м; квадрат радиуса инерции $\rho_y^2 = 1,42$ м². Масса фундамента $m_\phi = 25$ т; масса оборудования $m_{об} = 4$ т. Значения упругих коэффициентов жесткости c_i примем, полагая, что они зависят от основного коэффициента постели грунта c_z : $c_x = c_z$; $c_{z\phi} = 2,1c_z$; $c_{x\phi} = c_{z\phi\phi} = 0,7c_z$; $c_{x\phi} = c_{x\phi\phi} = 0,8c_z$. Грунт основания – глины и суглинки мягкопластичные, для которых $c_z = 30 \cdot 10^3$ кН/м. Диссипативные коэффициенты $\gamma_i = 0,1$.

Собственные частоты системы равны 74,9 и 131,8 рад/с.

Круговая частота нагрузки от оборудования $\omega = 157$ рад/с; амплитуда горизонтальной динамической силы $Q_1 = 10$ кН. Закон изменения горизонтальной нагрузки (в режиме пуска и остановки соответственно):

$$q_1(t) = Q_1(a_1 t)^2 / \omega^2 \cos[a_1(t^2 - t_1^2)/2 + \omega t_1] - \text{в режиме пуска};$$

$$q_1(t) = Q_1[\omega - b(t - t_2)]^2 \cos[\omega t - b_1(t - t_2)^2/2] / \omega^2 - \text{в режиме остановки},$$

где t_1 – время начала эксплуатационного режима;

t_2 – время начала остановки;

$a_1 = 31,4$ рад/с²; $b_1 = 7,85$ рад/с² – коэффициенты, характеризующие скорость изменения нагрузки в переходных режимах.

В качестве второго расчетного случая рассмотрим виброизолированное оборудование, установленное на массивный фундамент (расчетная схема представлена на рис. 4). Горизонтальная жесткость виброизоляторов $K = 5 \cdot 10^3$ кН/м. Согласно существующей практике, рассчитаем виброизолированное оборудование отдельно, считая его основание жестким [8]. Собственная частота виброизолированного оборудования равна 35,4 рад/с (5,6 Гц). Нагрузку на массивный фундамент определим, умножив горизонтальные перемещения оборудования на жесткость виброизоляторов. Рассчитаем массивный фундамент на полученную нагрузку. В этом случае $h_1 = h_2 = l_0 = h_0/2 = 0,75$ м. Момент инерции системы J_y определяется без учета слагаемого, включающего $m_{об}$. Все остальные характеристики такие же, как в первом случае. Собственные частоты системы равны 93,1 и 153,3 рад/с.

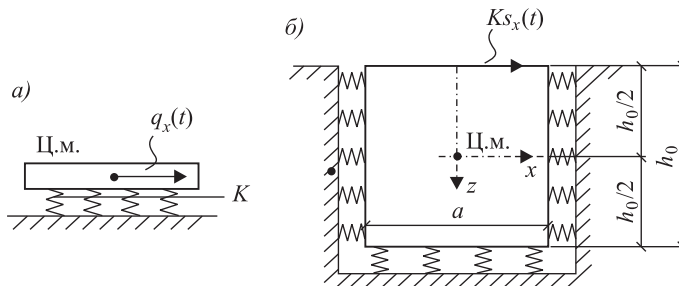


Рис. 4. Второй расчетный случай: виброизолированное оборудование установлено на массивный фундамент

a – расчетная схема виброизолированного оборудования; b – расчетная схема массивного фундамента

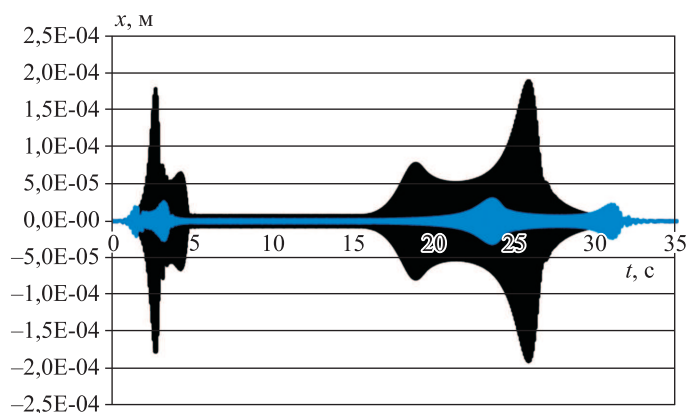


Рис. 5. Горизонтальные перемещения центра масс системы (черная линия – система с невиброизолированным оборудованием; синяя линия – система с виброизолированным оборудованием)

Результаты расчета представлены на рис. 5.

Максимальные горизонтальные перемещения массивного фундамента для первого расчетного случая (невиброизолированное оборудование) составили $1,9 \cdot 10^{-4}$ м, для второго расчетного случая (виброизолированное оборудование) составили $3,0 \cdot 10^{-5}$ м. Таким образом, использование виброизоляции позволяет снизить перемещения массивного фундамента, в частности, в 5–6 раз.

Из приведенного в статье следует, что способ расчета фундаментов с использованием передаточных и импульсных переходных функций может быть использован для широкого класса задач: например, для оборудования, установленного на массивный фундамент (как в виброизолированном, так и в невиброизолированном варианте установки). Кроме того, полученные формулы для передаточных и импульсных переходных функций для массивного фундамента предполагается использовать при оценке влияния перемещений фундамента на величины сейсмических сил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валеев А.Р., Таибулатов Р.Р., Галиуллин М.М. Снижение динамической нагрузки оборудования на этапе проектирования фундаментов нефтеперекачивающих станций // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 36–39.
2. Zhong (John) Liu. Design of Foundations for Large Dynamic Equipment in a High Seismic Region. Structures Congress 2013. Pittsburgh, Pennsylvania, United States. May 2-4, 2013.
3. Bhatia K.G. Foundations for industrial machines and earthquake effects // ISET J. of Earthquake Technology. 2008. Paper No. 495. Vol. 45. No. 1-2. P. 13–29.
4. Prakash S., Puri V.K. Foundations for Vibrating Machines // J. of Structural Engineering (Madras, India). Special Issue, April-May 2006.
5. Нуждин М.Л., Нуждин Л.В. Снижение колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом высоконапорного инъецирования // Construction and geotechnics. 2020. Т. 11. № 1. С. 41–52.

6. *Алексеев Б.Г.* О расчете заглубленных массивных фундаментов на вертикальные колебания // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1981. № 4. С. 21–25.
7. *Кондин А.Д., Гоц М.А. и др.* Рациональные конструкции фундаментов промышленных зданий. Л.; М.: Стройиздат, 1964. 212 с.
8. *Чернов Ю.Т.* Вибрации строительных конструкций. (Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям): Науч. изд. 2-е изд., испр. и доп. М.: АСВ, 2011. 384 с.
9. *Осипова М.В.* Расчет виброизолированных систем на динамические нагрузки с использованием передаточных функций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 18–20.
10. *Чернов Ю.Т., Волкова М.В.* К учету диссипативных сил при расчете систем виброзащиты с использованием передаточных и импульсных переходных функций // Строит. механика и расчет сооружений. 2016. № 6 (269). С. 43–47.

Волкова Мария Владимировна, канд. техн. наук; E-mail: marissa36@yandex.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Чернов Юрий Тихонович, д-р техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Кбейли Джаафар, асп.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено после доработки 16.06.2020

Volkova Mariya Vladimirovna, PhD; E-mail: marissa36@yandex.ru
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Chernov Yuriy Tikhonovich, DSc, Professor
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Qbaily Jaafar, Post-graduate Student
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

THE CALCULATION OF MASSIVE FOUNDATIONS DEPTHEDED IN THE SOIL UNDER THE EFFECT OF VIBRATION-ISOLATED AND NON-VIBRATION-ISOLATED EQUIPMENT

A method for calculating the horizontal-rotational vibrations of massive foundations depthed in the soil on the loads generated by vibroactive equipment is considered. The method proposed by prof. Yu.T. Chernov is based on the relation of transfer and pulse transition functions. The foundation is modeled as a system with three degrees of freedom (horizontal displacement, vertical displacement and angle of rotation). Soil is presented as an elastic base. The stiffness characteristics of the system are defined as the reaction forces of the soil base at a unit displacement of the foundation. Two examples of calculation are given: 1) foundation affected by non-vibration-isolated equipment; 2) foundation affected by vibration-isolated equipment. It is shown that when using vibration-isolated equipment, the movements of the massive foundation are decreased by 5–6 times, therefore, the loads on the foundation are decreased, which could reduce the cost of the foundation. The presented method can be used for a wide class of problems, in particular, when assessing the effect of foundation movements on the magnitude of seismic forces.

Key words: vibration-active equipment, vibration-isolated foundation, massive foundations, impulse transition functions, transfer functions, vibration-isolation.

REFERENCES

1. *Valeev A.R., Tashbulatov R.R., Galiullin M.M.* Snizheniye dinamicheskoy nagruzki oborudovaniya na etape proektirovaniya fundamentov nefteperekachivayushchikh stantsiy [Reducing the dynamic load of equipment at the stage of designing the foundations of oil pumping stations]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transport and storage of petroleum products and hydrocarbons]. 2016. No. 1. Pp. 36–39. (in Russian)
2. *Zhong (John) Liu.* Design of Foundations for Large Dynamic Equipment in a High Seismic Region. Structures Congress 2013. Pittsburgh, Pennsylvania, United States. May 2-4, 2013.
3. *Bhatia K.G.* Foundations for industrial machines and earthquake effects. ISET J. of Earthquake Technology. 2008. Paper No. 495. Vol. 45. No. 1-2. Pp. 13–29.
4. *Prakash S., Puri V.K.* Foundations for Vibrating Machines. J. of Structural Engineering (Madras, India). Special Issue, April-May 2006.
5. *Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V.* Snizheniye kolebaniy svaynykh fundamentov pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami metodom vysokonapornogo in'yetsirovaniya [Reducing levels of vibrations of pile foundations for machines with dynamic loads by high-pressure injection]. *Construction and geotechnics*. 2020. Vol. 11. No. 1. Pp. 41–52. (in Russian)
6. *Alekseev B.G.* O raschete zaglublennykh massivnykh fundamentov na vertikal'nyye kolebaniya [On the calculation of buried massive foundations for vertical vibrations]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [University News. Construction and architecture]. 1981. No. 4. Pp. 21–25. (in Russian)
7. *Kondin A.D., Gots M.A. et al.* Ratsional'nyye konstruksii fundamentov promyshlennykh zdaniy [Rational foundations structures of industrial buildings]. Leningrad; Moscow, Stroyizdat, 1964. 212 p. (in Russian)
8. *Chernov Yu.T.* Vibratsii stroitel'nykh konstruksiy. (Analiticheskiye metody rascheta. Osnovy proektirovaniya i normirovaniya vibratsiy stroitel'nykh konstruksiy, podvergayushchikhsya ekspluatatsionnym dinamicheskim vozdeystviyam) [Vibrations of building structures. (Analytical calculation methods. Fundamentals of design and regulation of vibration of building structures exposed to operational dynamic effects)]. Moscow, ASV, 2011. 384 p. (in Russian)
9. *Osipova M.V.* Raschet vibroizolirovannykh sistem na dinamicheskiye nagruzki s ispol'zovaniyem peredatochnykh funktsiy [Calculation of vibration isolated systems for dynamic loads using transfer functions]. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Earthquake-resistant construction. Building Safety]. 2013. No. 4. Pp. 18–20. (in Russian)
10. *Chernov Yu.T., Volkova M.V.* K uchetu dissipativnykh sil pri raschete sistem vibrozashchity s ispol'zovaniyem peredatochnykh i impul'snykh perekhodnykh funktsiy [Taking into account the dissipative forces when analyzing vibration protection systems using transfer and impulse transfer functions]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and structural analysis]. 2016. No. 6 (269). Pp. 43–47. (in Russian)