

**Для цитирования:** Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Сейсмическая реакция нелинейной системы сейсмозащиты с кинематическими опорами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):134-144. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

**For citation:** Abakarov A.D., Zajnulabidova H.R. Seismic reaction of nonlinear system of seismic defense with kinematic supports. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):134-144. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699 841

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ

Абакаров А.Д.<sup>1</sup>, Зайнулабидова Х.Р.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1,2</sup>367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup>e-mail:abakarov@bk.ru, <sup>2</sup>e-mail:hanzada1@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является получение формул расчёта вероятностных характеристик сейсмической реакции нелинейной системы сейсмоизоляции с заданной функцией «Сила-перемещение», характерной для системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, и оценка эффективности данной системы сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях. **Метод.** Исследования проведены аналитическими методами и численным методом статистических испытаний. **Результат.** Получены аналитические выражения для расчёта среднеквадратического значения перемещения одномассовой системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами и графики эффективности применения кинематических опор для сейсмоизоляции многоэтажных зданий, составленные по результатам численных экспериментов методом статистических испытаний. **Вывод.** Применение кинематических опор, с зависимостью «Сила-перемещение», описываемой заданной в работе нелинейной функцией, позволяет снизить сейсмические нагрузки на здания и перекосы этажей в 2 и более раза. Кинематические фундаменты более эффективны при высокочастотных воздействиях и в зданиях конструктивного решения высотой не более 5 этажей.

**Ключевые слова:** система сейсмоизоляции, кинематические опоры, упруго-нелинейная зависимость «Сила-перемещение», дифференциальное уравнение движения, уравнение Колмагорова, сейсмическая реакция одномассовой системы сейсмоизоляции, многоэтажные здания с кинематическими фундаментами, нестационарный случайный процесс, метод статистических испытаний, сейсмические нагрузки, перекосы этажей

TECHNICAL SCIENCE  
BUILDING AND ARCHITECTURE  
SEISMIC REACTION OF NONLINEAR SYSTEM OF SEISMIC DEFENSE WITH  
KINEMATIC SUPPORTS

Abacar D. Abakarov<sup>1</sup>, Hanzada R. Zajnulabidova<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup>Daghestan State Technical University,  
<sup>1,2</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala, 367026, Russia,  
<sup>1</sup>e-mail: abakarov@bk.ru, <sup>2</sup>e-mail: hanzada1@mail.ru

**Abstract Objectives.** The aim of the study is to obtain formulae for calculating probability of seismic response characteristics of nonlinear seismic isolation system with the specified function "force-shifting", characteristic of seismic isolation system with kinematic pillars and score the effectiveness of this system of seismic isolation in multi-storey buildings. **Method.** The studies were performed analytical techniques and numerical method of statistical tests. **Result.** Analytical expressions to calculate the mean square value of onemassive seismic isolation system with displacement kinematic pillars and the effectiveness of the application of graphs of kinematic seismic isolation bearings for multi-storey buildings based on the results of numerical experiments using the method of statistical tests. **Conclusion.** Application of kinematic supports, with "power-move" described by the specified in the work of a nonlinear function, allows you to reduce the seismic loads on buildings and distortions of floors 2 or more times. Kinematic bases are more effective when high-frequency effects and in the buildings of the constructive solution of a height of not more than 5 floors.

**Keywords:** seismic isolation system, kinematic supports, elastic-nonlinear dependence "force-shifting", differential equation of motion, Kolmagorova equation, seismic response of one massive seismic isolation systems, mezzanine buildings with foundations, kinematic Nonstationary random process, a method of statistical tests, seismic loads, distortions of floors

**Введение.** Специальные системы сейсмозащиты зданий, основанные на принципах адаптации, сейсмоизоляции, энергопоглощения, гашения колебаний и приспособляемости находят широкое применение во многих странах. Они отличаются большей эффективностью и надежностью в отличие от систем, основанных на традиционных подходах к обеспечению сейсмостойкости. Вопросам сейсмозащиты и сейсмоизоляции зданий и сооружений посвящена обширная литература отечественных и зарубежных специалистов, основополагающими из которых являются [1-16].

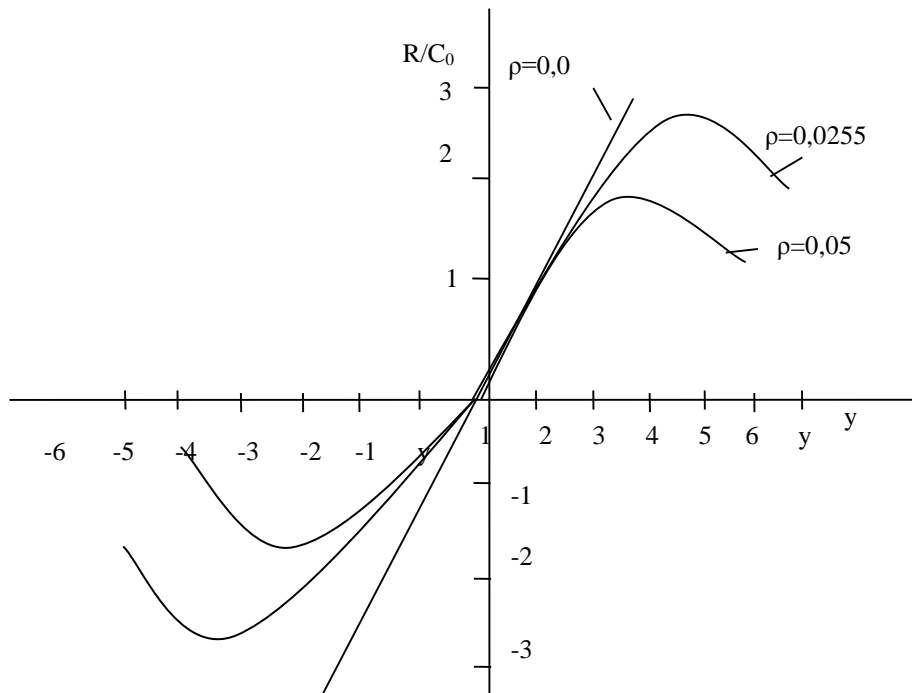
Одним их эффективных методов сейсмоизоляции зданий является обеспечение податливости надземной части здания относительно подземной части установкой между ними кинематических (качающихся) опор [10-16]. Кинематические опоры приводят к упруго-нелинейным колебаниям сооружения, где график «Сила-перемещение» чаще всего имеет плавную восходящую и нисходящую ветви [4, 19, 20]. Нисходящая ветвь связана с крутящим моментом, передаваемым весом здания на опоры в процессе их качения. Кинематические опоры широкое практическое применение, на наш взгляд, не находят в связи с отсутствием должного обоснования их эффективности при разных ситуациях, связанных с параметрами сейсмического воздействия и самих опор.

**Постановка задачи.** Рассматривается система сейсмоизоляции, зависимость "R-y" которой может быть аппроксимирована нелинейной функцией следующего вида:

$$R(y) = C_0 \cdot y \cdot (1 - \rho \cdot y^2) \quad (1)$$

Здесь  $C_0$  определяет наклон кривой в начальной точке 0, а  $\rho$  является параметром нелинейности. При  $\rho=0$  функция (1) становится линейной. Значения параметров  $C_0$  и  $\rho$  следует найти по экспериментально полученной зависимости "R-y" для рассматриваемых кинематических фундаментов. Кривые, описываемые функцией (1), имеют плавный выпуклый характер с восходящей и нисходящей ветвями. На рис. 1 приведены графики функции (1) при  $\rho=0,025$ ; 0,05 и 0,1.

Путём подбора  $C_0$  и  $\rho$  функция (1) может описать экспериментальные зависимости в широких пределах.



**Рис.1. Нелинейная зависимость «R-y» для системы с кинематическими опорами**  
**Fig.1. Non-linear dependence «R-y» for a system with kinematic supports**

Дифференциальное уравнение колебаний одномассовой системы с рассматриваемой нелинейно-упругой зависимостью имеет вид:

$$\ddot{y}(t) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \dot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) \cdot (1 - \rho \cdot y^2(t)) = -\ddot{y}_{zp}(t), \quad (2)$$

здесь  $\omega_0^2 = \sqrt{C_0/m}$ .

Сейсмические колебания грунтов моделируем "белым шумом" со спектральной плотностью  $S_0$ .

**Методы исследования.** Решение (2) будем искать с помощью уравнения Колмогорова [17, 18]. Для этого представим (2) в виде системы двух уравнений первого порядка, полагая  $\dot{y} = y_1$ ,  $y = y_2$ ;

$$\begin{cases} \dot{y}_1 + 2 \cdot \varepsilon \cdot y_1 + \omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3 = -\dot{y}_{zp}(t) \\ \dot{y}_2 - y_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Обозначим через  $P=P(y_1, y_2)$  совместную плотность вероятностей  $y_1$  и  $y_2$ .

Тогда второе уравнение Колмогорова, соответствующее стационарному решению, имеет вид:

$$y_1 \frac{\partial P}{\partial y_2} - 2 \cdot \varepsilon \cdot P - 2 \cdot \varepsilon \cdot y_1 \frac{\partial P}{\partial y_1} - (\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \frac{\partial P}{\partial y_1} - \frac{S_0}{2} \frac{\partial P}{\partial y_1^2} = 0 \quad (4)$$

Представим (4) в виде:

$$\frac{\partial}{\partial y_1} \left[ (\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot \rho + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_2} \right] + \left( -\frac{\partial}{\partial y_2} + 2 \cdot \varepsilon \frac{\partial}{\partial y_1} \right) \cdot \left( P \cdot y_1 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_1} \right) = 0 \quad (5)$$

Приняв плотность вероятности  $P(y_1, y_2)$  в виде произведения  $P_1(y_1) \cdot P_2(y_2)$ , получим:

$$\frac{\partial}{\partial y_1} \left\{ P_1 \cdot \left[ (\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot P_2 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial P_2}{\partial y_2} \right] \right\} + \left( -\frac{\partial}{\partial y_2} - 2 \cdot \varepsilon \frac{\partial}{\partial y_1} \right) \cdot \left[ P_2 \cdot \left( P_1 \cdot y_1 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial P_1}{\partial y_1} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

Для обращения (6) в тождество необходимо, чтобы функции  $P_1$  и  $P_2$  удовлетворяли уравнениям:

$$\frac{\partial P_2}{\partial y_2} + \frac{(\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot 4 \cdot \varepsilon}{S_0} \cdot P_2 = 0$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial y_1} + \frac{4 \cdot \varepsilon}{S_0} \cdot y_1 \cdot P_1 = 0$$

Решая их, получим:

$$P_1 = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot y_1^2\right), \quad (7)$$

$$P_2 = C_2 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2\right) \cdot \exp\left(\rho \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot y_2^4\right), \quad (8)$$

Произвольные постоянные  $C_1$  и  $C_2$  находим из условий:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_1(y_1) dy_1 = 1; \quad \int_{-\infty}^{\infty} P_2(y_2) dy_2 = 1.$$

Для  $C_1$  имеем

$$C_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon}{\pi \cdot S_0}}, \quad (9)$$

Дисперсию скорости системы находим в виде:

$$\sigma_{y'}^2 = C_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_1^2 \cdot P_1(y_1) dy_1 \quad (10)$$

Подставив (8) и (9) в (10), получим:

$$\sigma_{y'}^2 = \frac{S_0}{4} \cdot \varepsilon.$$

Дисперсию перемещения системы находим так:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_2^2 \cdot P_2(y_2) dy_2, \quad (11)$$

Для получения замкнутого решения,  $P_2$  представим в виде:

$$P_2 = C_2 \cdot e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \left[ 1 + \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 + \dots \right], \quad (12)$$

где  $a = 2 \cdot \varepsilon / S_0$ .

Произвольную постоянную  $C_2$  определяем из условия:

$$C_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \cdot \left[ 1 + \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 \right] dy_2 = 1. \quad (13)$$

Интегрируя (13) с применением таблицы интегралов [21], и после некоторых преобразований, получим:

$$C_2 = \frac{\omega_0^5 \cdot a^{5/2}}{\left( \sqrt{\pi \cdot \omega_0^4 \cdot a^2 + 0.625 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot \rho + 1.46 \cdot \rho^2} \right)} \quad (14)$$

Интегрируя (11) с учётом (12), будем иметь:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_2^2 \cdot e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \cdot \left[ 1 + \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 \right] dy_2 = C_2 \cdot \left[ \frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^3} \cdot \Gamma \cdot (3/2) + \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{2 \cdot (\omega_0 \cdot \sqrt{a})^7} \cdot \Gamma \cdot (7/2) + \frac{a \cdot \rho \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^{11}} \cdot \Gamma \cdot (11/2) \right]$$

Учитывая, что  $\Gamma(3/2) = 0,8862$ ,  $\Gamma(7/2) = 3,3232$ ,  $\Gamma(11/2) = 52,34$  и после некоторых преобразований, получим:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^3} \cdot \left[ 0.8862 + 1.6616 \cdot \frac{\rho}{\omega_0 \cdot a} + 6.5426 \cdot \frac{\rho^2}{\omega_0^4 \cdot a^2} \right], \quad (15)$$

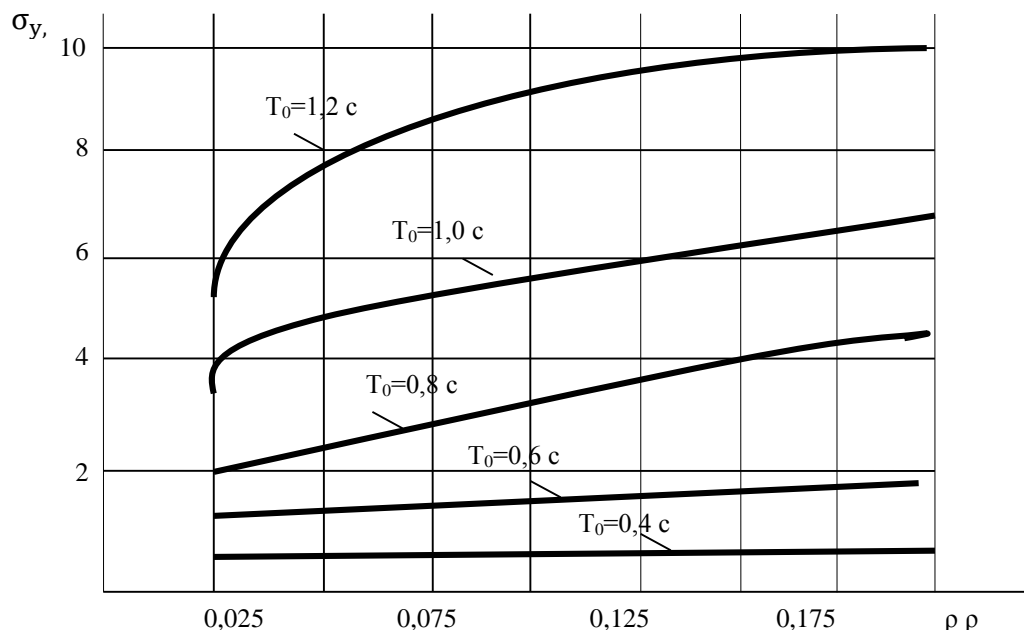
Подставив в (15) выражение для  $C_2$  из (14), находим:

$$\sigma_{y''}^2 = \sigma_{y''_0}^2 \cdot \frac{1.772 \cdot \omega_0^2 \cdot a^2 + 3.32 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot \rho + 13.08 \cdot \rho^2}{1.772 \cdot \omega_0^2 \cdot a^2 + 0.625 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot \rho + 1.46 \cdot \rho^2}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{y''_0}^2 = S_0 / (4 \cdot \varepsilon \cdot \omega_0^2)$  - среднеквадратическое значение перемещения системы

$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y''}^2}$ , а среднее из максимальных -  $\ddot{y} \approx 3 \cdot \sigma_y$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $\sigma_y$  от  $\rho$  и  $T_0 = 2 \cdot \pi / \omega_0$  при величине спектральной плотности сейсмического воздействия  $S_0 = 300 \text{ см}^3/\text{с}^3$ .



**Рис. 2. Зависимость среднеквадратической величины перемещения системы от периода  $T_0$  и коэффициента  $\rho$**

**Fig.2. Dependence of the rms value of the displacement of the system from the period  $T_0$  and the coefficient  $\rho$**

Выражение (16) может быть применено при оценке надёжности зданий с кинематическими опорами, моделируемых в виде одномассовой системы.

Для многоэтажных зданий с кинематическими опорами, моделируемых в виде нелинейных многомассовых систем, получение аналитических выражений для расчёта вероятностной сейсмической реакции является сложной задачей.

Поэтому такие задачи следует решать методом статистических испытаний, моделируя на ЭВМ сейсмическое воздействие в виде нестационарного случайного процесса и интегрируя исходную систему дифференциальных уравнений на ЭВМ.

Вероятностные характеристики сейсмической реакции системы при этом находят путём статистической обработки полученных результатов. В данной работе с целью оценки эффективности системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, описываемых зависимостью "Сила-перемещение" вида (1), методом статистических испытаний исследованы 3, 5 и 9 этажные крупнопанельные здания.

**Обсуждение результатов.** Полученные результаты исследований приведены на рис. 3-8.

При этом через КФ-2 названы кинематические фундаменты с параметрами  $C=1000$  и  $\rho=0,001$ , а через КФ-3 - с параметрами  $C=1000$  и  $\rho=0,0001$ .

Графики показывают, что при расчётном ускорении колебания грунта, равном  $490 \text{ см/с}^2$ , целесообразнее возводить 3-х этажные здания с кинематическими фундаментами, так как в этом случае величина  $P_0$  на периодах  $0,1 \div 0,4$  сек, близка к 1, с увеличением  $T_j$  до 0,5 сек –  $P_0=0,8$ , а при  $T_j=0,6$  сек –  $P_0=0,6$ . Таким образом, строительство 3-х этажных зданий эффективно при  $T_j=0,1 \div 0,5$  сек, 5-ти этажных при  $T_j=0,1 \div 0,4$  сек, а 9-ти этажных при  $T_j=0,1-0,2$  сек.

Величина перекося этажа являются важным параметром, от которого зависит надёжность каждого этажа здания, а, следовательно, зависит и надёжность здания в целом.

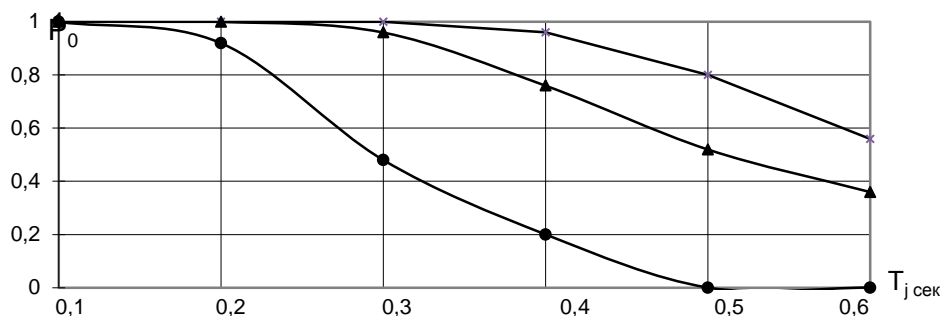


Рис. 3. Графики изменения вероятностей невыщшения  $P_0$  нулевым уровнем здания на кинематических фундаментах типа КФ-3, заданного значения перемещения  $[y_0]$ , равного 30 см, при сейсмическом воздействии с расчётным ускорением колебания грунта  $a_{расч} = 490 \text{ см/с}^2$  и преобладающим периодом колебаний в интервале  $T_j = 0,1 \div 0,6$  сек

- ■ — трёхэтажное здание
- ▲ — пятиэтажное здание
- ● — девятиэтажное здание

Fig.3. Graphs of changing the non-exceedance probabilities  $P_0$  by the building zero level on kinematic foundations of type KF-3, given a displacement value  $[y_0]$  of 30 cm, under seismic impact with a calculated acceleration of ground motion  $a_{расч} = 490 \text{ cm / s}^2$  and the prevailing period of oscillations in the range of  $T_j = 0.1 \div 0.6$  seconds

- ■ - three-storey building
- ▲ - five storey building
- - nine storey building

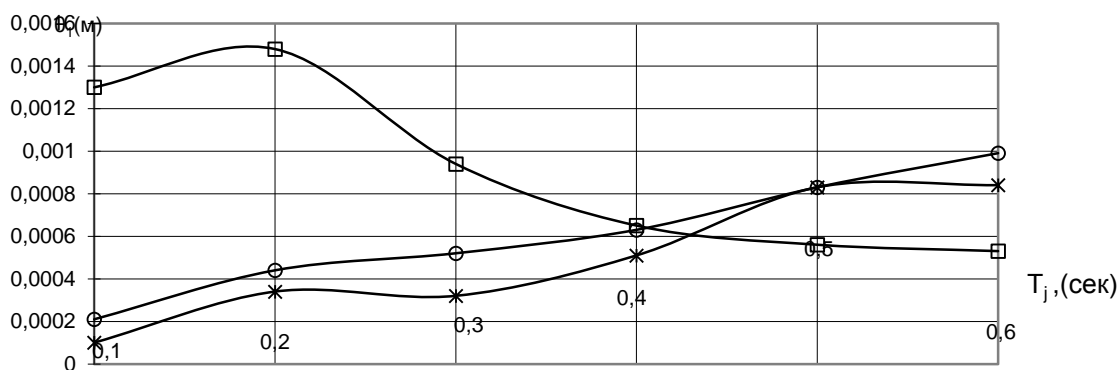


Рис.4. Графики изменения перекосов первого этажа 5-ти этажного здания в зависимости от типа фундамента при сейсмическом воздействии с параметрами  $a_{расч} = 420 \text{ см/с}^2$  и  $T_j = 0,1 \div 0,6$  сек

- □ — система без сейсмоизоляции
- ж — система с кинематическими фундаментами типа КФ-2
- о — система с кинематическими фундаментами типа КФ-3

Fig. 4. Graphs of changes in the distortions of the first floor of a 5-storey building, depending on the type of foundation under seismic effects with parameters  $a_{расч} = 420 \text{ cm / s}^2$  and  $T_j = 0.1 \div 0.6$  s

- □ — system without seismic isolation
- zh — system with kinematic foundations of type KF-2
- o — system with kinematic foundations of type KF-3

Рис. 4 и 5 наглядно демонстрируют зависимость перекосов этажей  $\theta$  от значений преобладающих периодов колебаний грунтов и типа фундамента.

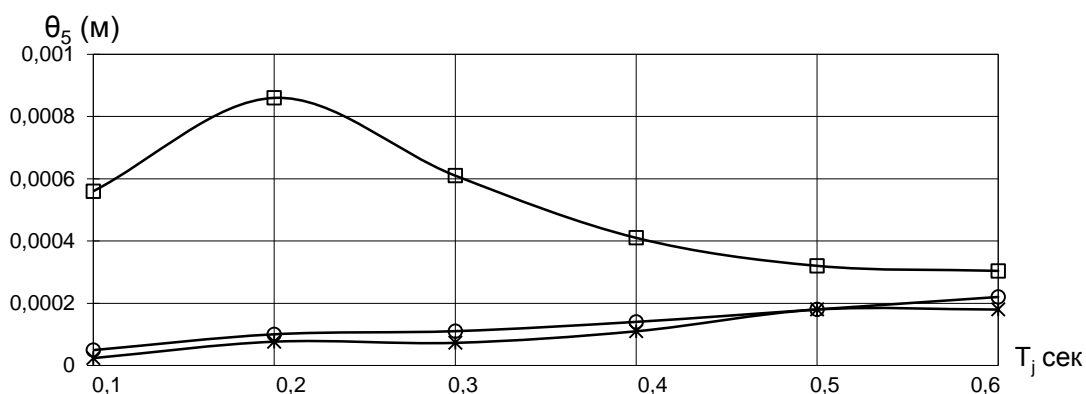


Рис. 5. Графики изменения перекосов пятого этажа 5-ти этажного здания в зависимости от типа кинематического фундамента при сейсмическом воздействии с параметрами  $a_{расч}=320$  см/с<sup>2</sup> и  $T_j=0,1÷0,6$  сек

- система без сейсмоизоляции
- ж— система с кинематическими фундаментами типа КФ-2
- о— система с кинематическими фундаментами типа КФ-3

Fig. 5. Graphs of changes in distortions of the fifth floor, 5-storey building, depending on the type of kinematic foundation in a seismic effect with parameters  $a_{расч} = 320$  cm / s<sup>2</sup> and  $T_j = 0.1 ÷ 0.6$  sec

- system without seismic isolation
- zh— system with kinematic foundations of type KF-2
- o— system with kinematic foundations of type KF-3

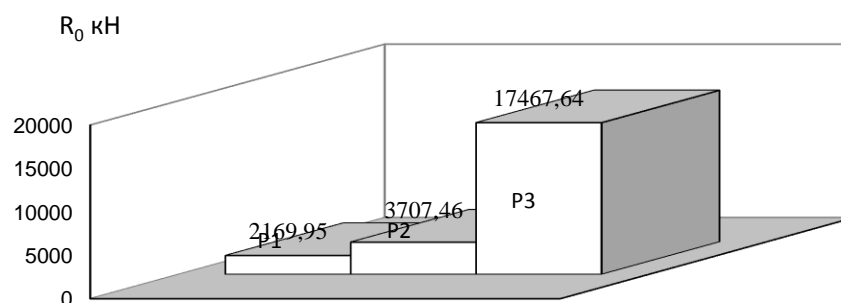


Рис. 6. Диаграммы изменения упругих реакций в уровне массы  $m_0$  трёх этажного здания в зависимости от типа применяемых фундаментах при сейсмическом воздействии параметрами  $a_{расч}=420$  см/с<sup>2</sup> и  $T_j=0,1$  сек

- P1 – система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- P2 – система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- P3 - система без активной сейсмоизоляции

Fig. 6. Diagrams of changes in elastic reactions in the mass level  $m_0$  of a three-story building depending on the type of foundations used under seismic action with parameters  $a_{расч} = 420$  cm / s<sup>2</sup> and  $T_j = 0.1$  s

- P1 - a system with kinematic foundations of the type KF-2,
- P2 - system with kinematic foundations of the type KF-3,
- P3 - system without active seismic isolation

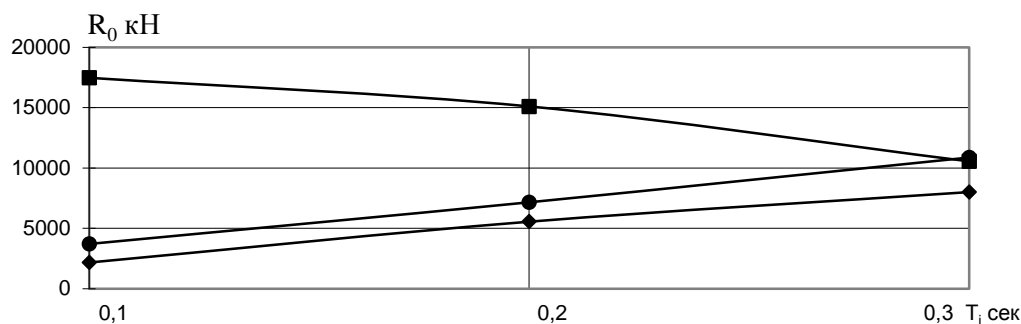


Рис.7. Графики горизонтальных сдвигающих сил, действующие на трёхэтажное здание в уровне массы  $m_0$  при сейсмическом воздействии с параметрами  $a_{расч}=420 \text{ см/с}^2$  и  $T_j=0,1 \div 0,3$  сек

- ◆— система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- система без активной сейсмоизоляции

Fig. 7. Graphs of horizontal shear forces acting on a three-story building at the mass level  $m_0$  under seismic effects with parameters  $a_{расч} = 420 \text{ cm} / \text{s}^2$  and  $T_j = 0.1 \div 0.3 \text{ s}$

- ◆—system with kinematic foundation type KF-2,
- system with kinematic foundations of the type KF-3,
- system without active seismic isolation

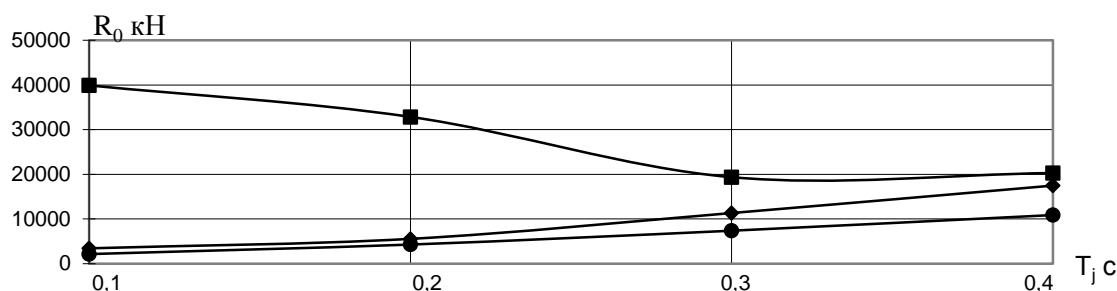


Рис. 8. Графики горизонтальных сдвигающих сил  $R_0$  (кН) действующие на пятиэтажное здание в уровне массы  $m_0$  при сейсмическом воздействии параметрами  $a_{расч}=320 \text{ см/с}^2$  и  $T_j=0,1 \div 0,4$  сек

- ◆—система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- система без сейсмоизоляции

Fig. 8. Graphs of horizontal shear forces  $R_0$  (kN) acting on a five-story building at a mass level of  $m_0$  with seismic effects with parameters  $a_{расч} = 320 \text{ cm} / \text{s}^2$  and  $T_j = 0.1 \div 0.4 \text{ s}$

- ◆—system with kinematic foundation type KF-2,
- system with kinematic foundation type KF-3,
- system without seismic isolation

Вышеприведённые графики показывают высокую эффективность систем сейсмоизоляции с рассматриваемыми кинематическими опорами, особенно когда количество этажей здания не превышает пяти. Здесь при высокочастотных сейсмических воздействиях сейсмические нагрузки и перекосы этажей здания снижаются в 2 и более раза.

Сейсмическая реакция системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, зависимость «Сила-перемещение» которых описывается нелинейной функцией с восходящей и нисходящими ветвями, параметры которой могут охватить экспериментальные зависимости для широкого круга систем с кинематическими опорами.

Дано аналитическое решение задачи оценки сейсмической реакции системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, моделируемой в виде одномассовой системы и приведены



результаты исследования сейсмической реакции 3, 5 и 9 массовых консольных стержней, моделирующих крупнопанельные здания с кинематическими опорами в уровне верха фундаментов.

Результаты исследований показывают высокую эффективность кинематических опор с нелинейной зависимостью «R-y» предлагаемой в данной работе.

Более эффективными данные системы сейсмоизоляции оказались при сейсмических воздействиях с преобладающими высокими частотами и количестве этажей здания, не превышающем 5.

**Вывод.** Предложенная нелинейная функция «Сила-перемещение» для описания экспериментально полученных результатов для системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами охватывает широкий диапазон параметров кинематических опор и позволяет достаточно точно их аппроксимировать.

Полученное математическое выражение для определения вероятностных значений перемещений одномассовых систем на кинематических опорах может быть использовано в расчётах их надёжности.

Результаты численных экспериментов многоэтажных зданий на кинематических опорах, проведённых при сейсмическом воздействии, представленном в виде нестационарного случайного процесса, показывают высокую эффективность систем сейсмоизоляции с кинематическими опорами, движение которых описывает предлагаемая в работе аппроксимирующая функция.

#### Библиографический список:

1. Айзенберг, Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я.М. Айзенберг. – М.: Стройиздат, 1976. - 229 с.
2. Поляков, В.С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В.С. Поляков, Н.Ш. Килимник, А.В. Черкашин. - М.: Стройиздат, 1989.-320 с.
3. Черепинский, Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах /Основания, фундаменты и механика грунтов / Ю.Д. Черепинский. - 1972.-№3.- С.13-15
4. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция зданий (сборник статей) / Ю.Д. Черепинский - Москва, 2009.-358 с.
5. Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципы устройства, особенности расчёта) //О.А. Савинов / Избранные статьи и доклады "Динамические проблемы строительной техники". - Санкт-Петербург, 1993. - С.155-178.
6. Уздин, А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений // А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Самих Амин Аль-Насер-Мохомад. -СПБ.: Изд. ВНИИГ, 1993. - 175 с.
7. Уздин, А.М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений // А.М. Уздин, С.В. Елизаров, Т.А. Белаш. - М.: ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. - 500 с.
8. Skiner, R.I. An introduction to seismic isolation / R.I. Skiner, W.H. Robinson, G.H. McVerry.-New Zealand: John Wiley & Sons, 1993. - 353 p.
9. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer. 1997, Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer / J.M. Kelly. - London: Springer - Verl., 1997. - 243 p.
10. Назин, В.В. Индустриализация строительства сооружений сейсмостойкой конструкции / В.В. Назин. - Киев: Будивельник, 1977. - 90 с.
11. Курзанов, А.В. Натурные исследования трёхэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах // А.В. Курзанов, А.М. Ахмедов // Эксперсс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. 1994. - Вып. 2-3. - С. 24-32.
12. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция жилых зданий / Ю.Д. Черепинский. - Алма-Аты, 2003. -157 с.
13. Аубакиров, А.Т. Особенности задания сейсмического воздействия для обоснования проекта сейсмоизолирующих фундаментов / А.Т. Аубакиров // Известия ВНИИГ. – 1989. - Т. 212. - С. 102 - 109
14. Юсупов А.К. Проектирование сейсмостойких зданий на кинематических опорах /А.К. Юсупов – Махачкала: Издательство «Лотос», 2006. - 422 с.
15. Авидон Г.Э., Карлина Е.А. Особенности колебаний зданий с сейсмоизолирующими фундаментами / А.М. Курзанова и Ю.Д. Черпинского // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №1, 2008. - С. 42–44.
16. Абакаров А.Д. Влияние параметров нелинейности на сейсмическую реакцию зданий с кинематическими опорами / А.Д. Абакаров, Х.Р. Зайнулабидова / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №6, 2003. - С. 35-38.
17. Тихонов, В.И. Марковские случайные процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов - М.: Совет. радио, 1977. - 485 с.
18. Гусев, А.С. Расчёт конструкций при случайных воздействиях / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
19. Кириков Б.А. Расчёт нелинейных систем с одной степенью свободы на интенсивные сейсмические воздействия / Б.А. Кириков – Строительная механика и расчёт сооружений. №5, 1983. С. 38-42.

20. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т./Ред. Совет. В.Н. Челомей (пред.) – М. Машиностроение, 1979 – т.2. Колебания нелинейных механических систем /Под. Ред. Н.Н. Блехмана. – 1979 – 351 с.
21. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы /Г.Б. Двайт - М.: Наука, 1977. - 224 с.

#### References:

1. Ayzenberg, YA.M. Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazyami dlya seysmicheskikh rayonov / YA.M. Ayzenberg. – М.: Stroyizdat, 1976. - 229 s. [Eisenberg, J.M. Buildings with vykljuchajushhimisja links for seismic areas /J.M. Eisenberg. - М.: Stroiizdat, 1976. - 229 p. (In Russ)]
2. Polyakov, V.S. Sovremennyye metody seysmozashchity zdaniy / V.S. Polyakov, N.SH. Kilimnik, A.V. Cherka-shin. - М.: Stroyizdat, 1989.-320 s. [Polyakov V.S. Modern methods of seismic protection of buildings /V.S Polyakov, N.SH. Kylymnyk., A.V. Cherkashin. - М.: Stroiizdat, 1989.-320 p. (In Russ)]
3. Cherepinskiy, YU.D. K seysmostoykosti zdaniy na kinemacheskikh oporakh /Osnovaniya, fundamenty i me-khanika gruntov / YU.D. Cherepinskiy. - 1972.-№3.- S.13-15 [Cherepinskiy, Y.D. The earthquake resistance of buildings on kinematic/base supports, foundations and soil mechanic / Y.D. Cherepinskiy. -1972.-№3.- P.13-15. (In Russ)]
4. Cherepinskiy, YU.D. Seysmoizolyatsiya zdaniy (sbornik statey) / YU.D. Cherepinskiy - Moskva, 2009.-358 s. [Cherepinskiy, Y.D. seismic isolation buildings (collection of articles)/Y.D. Cherepinskiy-Moscow, 2009. - 358 p. (In Russ)]
5. Savinov, O.A. Seysmoizolyatsiya sooruzheniy (kontseptsiya, printsipy ustroystva, osobennosti raschota) //O.A. Savinov / Izbrannyye stat'i i doklady "Dinamicheskiye problemy stroitel'noy tekhniki". - Sankt-Peterburg, 1993. - S.155-178. [Savinov, O.A. Seismic isolation structures (concept, principles, especially calculation devices)//O.A. Savinov /Featured articles and reports "Dynamic problems of construction machinery". -St. Petersburg, 1993. - P. 155-178. (In Russ)]
6. Uzdin, A.M. Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy // A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Samikh Amin Al'-Naser-Mokhomad. -SPB.: Izd. VNIIG, 1993. - 175 s. [Uzdin, A.M. Foundations of the theory of seismic and earthquake-proof construction of buildings and structures//A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Amin Al-Nasser-Mohomad. -St. Petersburg: Izd. VNIIG, 1993. -175 p. (In Russ)]
7. Uzdin, A.M. Seysmostoykiye konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy / /A.M. Uzdin, S.V. Yeliza-rov, T.A. Belash. - М.: FGBOU Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transpor-te, 2012. - 500 s. [Uzdin, A.M. Earthquake resistant constructions of buildings and structures //A.M. Uzdin, S.V. Elizarov, T.A. Belash. - М.: FEDERAL training centre for education on rail safety 2012. -500 p. (In Russ)]
8. Skiner, R.I. An introduction to seismic isolation / R.I. Skiner, W.H. Robinson, G.H. McVerry.-New Zealand: John Wiley & Sons, 1993. - 353 p.
9. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer. 1997, Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer / J.M. Kelly. - London: Springer - Verl., 1997. - 243 p.
10. Nazin, V.V. Industrializatsiya stroitel'stva sooruzheniy seysmostoykoy konstruksii / V.V. Nazin. - Kiyev: Budivel'nik, 1977. - 90 s. [Nazin, V. V. Industrialization of construction of earthquake-resistant structures / V. V. Nazin. - Kiev: Budivelnik, 1977. - 90 p. (In Russ)]
11. Kurzanov, A.V. Naturnyye issledovaniya trokhetazhnogo fragmenta i pyatietazhnogo zdaniya na seysmoizo-liruyushchikh oporakh // A.V. Kurzanov, A.M. Akhmedov // Eksperss-informatsiya VNIIS. Ser. 14. Seysmostoy-koye stroitel'stvo. 1994. - Vyp. 2-3. - S. 24-32. 1 [Kurzanov, A. V. Field studies of a three-story fragment and five-storey buildings with seismic isolation bearings // V. A. Kurzanov, A. M. Akhmedov // Express-information de La direction. Ser. 14. Earthquake engineering. 1994. - Vol. 2-3. - P. 24-32. (In Russ)]
12. Cherepinskiy, YU.D. Seysmoizolyatsiya zhilykh zdaniy / YU.D. Cherepinskiy. - Alma-Aty, 2003. -157 s. [Cherepinsky J. D., seismic isolation of residential buildings / yd Cherepinsky. - Alma-ATA, 2003. -157 p. (In Russ)]
13. Aubakirov, A.T. Osobennosti zadaniya seysmicheskogo vozdeystviya dlya obosnovaniya proyekta seysmoizo-liruyushchikh fundamentov / A.T. Aubakirov // Izvestiya VNIIG. – 1989. - T. 212. - S. 102 - 109 [Aubakirov, T. A. features of setting of the seismic impact for substantiation of the project of seismic isolation foundations / A. T. Aubakirov // Izvestiya VNIIG. - 1989. - Vol. 212. - P. 102 – 109. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. Proyektirovaniye seysmostoykikh zdaniy na kinemacheskikh oporakh /A.K. Yusupov – Makhach-kala: Izdatel'stvo «Lotos», 2006. - 422 s. [Yusupov A. K., earthquake resistant Design of buildings on kinematic supports /A. K. Yusupov – Makhachkala: Publishing house "Lotus", 2006. – 422 c. (In Russ)]
15. Avidon G.E., Karlina Ye.A. Osobennosti kolebaniy zdaniy zdaniy s seysmoizoliruyushchimi fundamenta-mi / A.M. Kurzanova i YU.D. Cherpinskogo // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. №1, 2008. - S. 42–44. [Avidan G. E., Carlin, E. A. Vibration Characteristics of buildings with seismic isolation Foundation / Kurzanov A. M. and J. D. Karpinskogo // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. No. 1, 2008. C. 42-4415. Dwight, G.B. Tables of integrals and other mathematical formulas /G.B. Dwight - М.: Science, 1977. - 224 p. (In Russ)]
16. Abakarov A.D. Vliyaniye parametrov nelineynosti na seysmicheskuyu reaktsiyu zdaniy s kinemacheskimi oporami / A.D. Abakarov, KH.R. Zaynulabidova / Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. №6, 2003. - S. 35-38. [Abakarov A. D. Influence of parameters of nonlinearity on the seismic response of buildings with kinematic supports / D. A. Abakarov, R. H. Zainalabidov / Earthquake-resistant construction. Safety of structures. No. 6, 2003. P. 35-38 (In Russ)]
17. Tikhonov, V.I. Markovskiye sluchaynyye protsessy / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov - М.: Sovet. radio, 1977. - 485 s. [Tikhonov, V. I. Markov random processes / V. I. Tikhonov and M. A. Mironov, М.: the Council. radio, 1977. - 485 p. (In Russ)]

18. Gusev, A.S. Raschot konstruktivnykh pri sluchaynykh vozdeystviyakh / A.S. Gusev, V.A. Svetlitskiy - M.: Ma-shinostroyeniye, 1984. - 240 s. [Gusev, A. S. analysis of structures for random effects / A. S. Gusev, V. A. Svetlitskiy - M.: Mashinostroyeniye, 1984. - 240 p. (In Russ)]
19. Kirikov B.A. Raschot nelineynykh sistem s odnoy stepen'yu svobody na intensivnyye seysmicheskiye voz-deystviya / B.A. Kirikov – Stroitel'naya mekhanika i raschot sooruzheniy. №5, 1983. S. 38-42. [Kirikov B. A. calculation of the nonlinear systems with one degree of freedom for intensive seismic effects / B. A. Kirikov – the Building mechanics and calculation of structures. No. 5, 1983. - P. 38-42. (In Russ)]
20. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti t./Red. Sovet. V.N. Chelomey (pred.) – M. Mashinostroyeniye, 1979 – t.2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem /Pod. Red. N.N. Blekhmana. – 1979 – 351 s. [Vibration in engineering: Handbook in 6 volumes/Ed. Council. V. N. Chelomey (pred.)- M. mechanical engineering, 1979-vol. 2. Oscillations of nonlinear mechanical systems / Sub. Ed. N. N. Blechman. 1979. – 351 p. (In Russ)]
21. Dvayt G.B. Tablitsy integralov i drugiye matematicheskiye formuly /G.B. Dvayt - M.: Nauka, 1977. - 224 s. [Dwight H. B. Tables of integrals and other mathematical formulas /H. B. Dwight, M.: Nauka, 1977. - 224 p. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Абакаров Абакар Джансулаевич** – доктор технических наук, профессор, кафедра архитектуры.

**Зайнулабидова Ханзада Рауповна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра архитектуры.

**Information about the authors:**

**Abakar J. Abakarov** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of architecture.

**Hanzada R. Zainalabidova** – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of architecture.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 22.06.2018.

**Принята в печать** 26.09.2018.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 22.06.2018.

**Accepted for publication** 26.09.2018.