

## 05.23.01 СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

### Сравнение эффективности опорных поверхностей в кинематической системе виброизоляции высотных сооружений

УДК 699.841

**Чипко С.А.**

Аспирант кафедры общеинженерных дисциплин, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

**Бурцева О.А.**

Канд. техн. наук, доцент кафедры общеинженерных дисциплин, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

**Абуладзе Н.Р.**

Аспирант кафедры общеинженерных дисциплин, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

Статья получена: 24.08.2020. Рассмотрена: 01.09.2020. Одобрена: 20.09.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

**Аннотация.** Получены динамические уравнения плоского движения системы виброизоляции высотного сооружения под действием внешнего кинематического возмущения. Рассмотрены различные случаи опорных поверхностей. Выполнен численный анализ изучаемого движения. Определена наилучшая комбинация опорных поверхностей. Выбран оптимальный размер опор качения.

**Ключевые слова:** виброизоляция, высотное здание, фундамент на шаровых опорах.

**Введение и актуальность, научная значимость вопроса.** Актуальность проблемы сейсмозащи-

ты зданий и сооружений объясняется постоянным наличием сейсмической активности в различных районах Земли. Степень опасности сейсмического воздействия зависит не столько от его силы, сколько от размеров ущерба, социального, экономического, экологического, который может возникнуть в результате человеческих потерь, разрушений зданий, сооружений, инженерной инфраструктуры.

Виброизоляция фундамента сооружений от сейсмического воздействия — широко и давно используемый способ защиты зданий от землетрясения. Кинематические опоры впервые использованы В.В. Назиным. Под его руковод-

#### EFFECTIVENESS COMPARISON OF SUPPORTING SURFACES IN THE BALL SYSTEM FOR VIBRATION ISOLATION OF HIGH-RISE BUILDINGS

**Chipko S.A.**

Postgraduate Student, Department of General Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk;  
e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

**Burtseva O.A.**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk;  
e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

**Abuladze N.R.**

Postgraduate Student, Department of General Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk; e-mail: kuzinaolga@yandex.ru

**Manuscript received:** 24.08.2020. **Revised:** 01.09.2020. **Accepted:** 20.09.2020. **Published online:** 30.09.2020. ©RIOR

**Abstract.** The mechanical system «a hard homogeneous ball» between the movable upper and lower supports is considered. Its dynamic equations by plane motions are obtained under the action of an external harmonic perturbation. Various cases of support surfaces are considered.

**Keywords:** vibroisolation, high-rise building, groundwork on solid ball.

ством были запроектированы и построены в Севастополе пятиэтажное здание с 6,5 тыс. ароцементных эллипсоидов вращения высотой 6 см, а также восьмизэтажное здание с 270 железобетонными стойками высотой 41 см со сферическими поверхностями торцов. В обоих сооружениях дополнительно были применены демпферы сухого трения. Системы виброизоляции с кинематическими опорами позволяют эффективно снижать амплитуду строительных сооружений, однако они недостаточно изучены, поскольку имеют нелинейные динамические характеристики. Применение систем с кинематическими опорами еще недостаточно изучено, особенно при горизонтальном воздействии с доминантным периодом более 1с.

Некоторые математические модели кинематических систем сейсмоизоляции приведены в работах В.П. Легезы [1–9], Г.В. Воронцова, С.И. Евтушенко [10–12]. Целью данной работы является получение динамических уравнений плоского движения кинематической системы виброизоляции высотного сооружения под действием внешнего кинематического возмущения, а также рассмотрение различных случаев опорных поверхностей, выполнение численного анализа изучаемого движения и определение наилучшей комбинации опорных поверхностей по критерию наименьшего отклонения сооружения от состояния равновесия. Приведена методика выбора оптимального размера кинематических опор.

**Постановка задачи.** Объектом исследования является высотное сооружение, установленное на подвижных кинематических опорах. Свайный фундамент высотного сооружения с размерами

в плане  $50 \times 50$  м опирается на скальное основание. Считаем, что размеры фундамента в плане малы по сравнению с длиной сейсмоволны. Поэтому в высотном сооружении при сейсмическом воздействии отсутствуют неравномерные осадки фундамента, а сам фундамент совершает поступательное движение в горизонтальной плоскости [13–14].

Фундамент сооружения разделен на две части. Нижняя часть воспринимает кинематическое возбуждение (несущая масса), а верхняя часть описывает динамику сооружения (несомая масса) (рис. 1).

Нижняя часть фундамента оснащена «стаканами», в которые вставлены столбчатые опоры (квадратного  $1 \times 1$  м или круглого сечения, радиуса 0,5 м) высотой 2 м. Дно «стаканов» выполнено из нержавеющей стали. Каждая столбчатая опора опирается на тела качения (цилиндры или шары) таким образом, чтобы сохранялась устойчивость опоры (рис. 2). Верхняя часть опор жестко соединена с сооружением [15–20]. В статье рассматривается задача в одной горизонтальной плоскости.

Считаем, что тела качения не проскальзывают относительно «стаканов» и столбчатых опор<sup>1</sup>. Ограничению движения опор способствуют стенки «стакана», специальная форма опорных поверхностей и гидравлические демпферы.

Такая шаровая система виброизоляции сейсмического воздействия всегда возвращается в исходное положение и готова к восприятию следующего горизонтального толчка. К ее недостатку следует отнести планирование кинематической системы виброизоляции на стадии возведения сооружения.

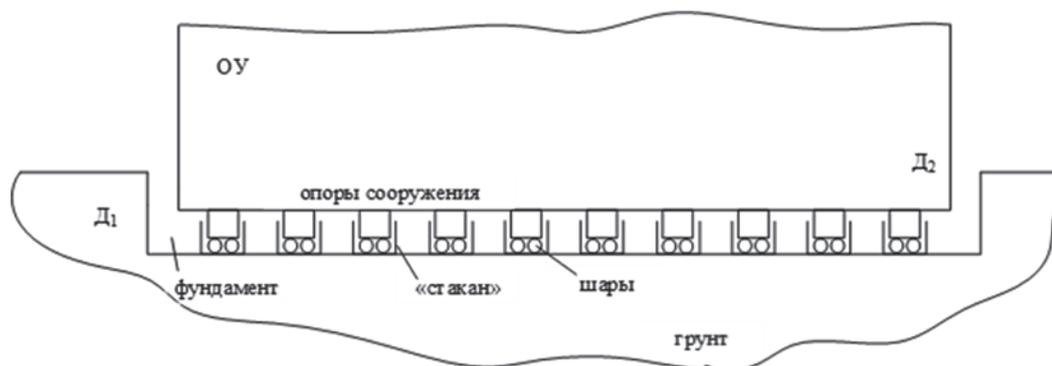


Рис. 1. Объект исследования — высотное сооружение с шаровыми опорами

<sup>1</sup> В дальнейшем это допущение будет усилено формой опорной поверхности в виде верхней циклоиды и нижней брахистохроны.

## Динамические уравнения виброизоляции

### 1. Несомая масса установлена на цилиндрах. Циклоидальные выемки отсутствуют (см. рис. 2).

С нижней частью сооружения (несущая масса) связываем абсолютную и переносную системы координат. Таким образом, нижняя часть сооружения (несущая масса) имеет параметры колебаний грунта  $x_{гр} = x_1$ ;  $v_{гр} = v_1$ ;  $a_{гр} = a_1$ . Требуем, чтобы высотное сооружение было неподвижным. Введенная система координат не является инерциальной, поэтому при составлении относительных уравнений движения несомой массы будем учитывать переносную и кориолисову силы инерции. Целью виброизоляции является минимизация движения несомой массы или сохранения ее неподвижности.

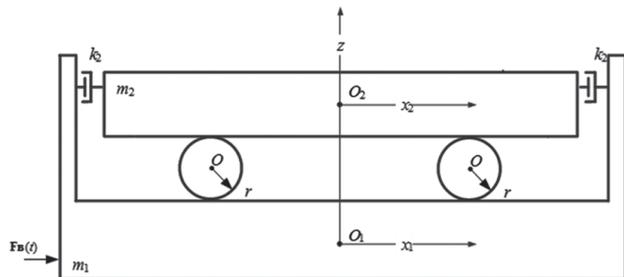


Рис. 2. Схема виброизоляции без циклоидальных выемок

Рассмотрим, что колебания грунта — в плоскости  $x_1 O_1 z_1$ . Вертикальные колебания имеют меньшую амплитуду и гасятся собственным весом сооружения.

Так как трение велико, считаем, что проскальзывание вдоль образующей цилиндров отсутствует, т.е. момент трения качения  $M_{ТК} < M_{ТК}^{max}$  (меньше некоторого максимального значения). Масса  $m_1$  совершает поступательное движение, цилиндры — плоское,  $C$  — центры масс цилиндров,  $P$  — его мгновенные центры скоростей (МЦС),  $r$  — радиус цилиндров.

На начальном этапе (при малых углах поворота цилиндров  $0 < \varphi < 5^\circ$ ) несомая масса  $m_2$  неподвижна и МЦС цилиндров находится в точке  $M$  (рис. 3).

На следующем этапе несомая масса приобретает скорость  $v^2 v_2$ , и точка МЦС смещается вниз по диаметру цилиндра  $AM$  на величину  $\xi$

<sup>1</sup>  $M_{ТК} = \delta N \varphi$  — момент трения качения, где  $\delta$  — коэффициент трения качения поверхностей,  $N$  — реакция опоры,  $\varphi$  — угол поворота цилиндра.

вплоть до остановки массы  $m_1$ . Условимся величину  $\xi$  отсчитывать от точки  $M$  сооружения. Вводя обобщенную координату  $x_1$ , характеризующую перемещения центра масс несущего тела, определим угловую скорость вращения цилиндров:

$$\omega = \frac{\dot{x}_1}{2r - \xi} = \frac{\dot{x}_2}{\xi}. \quad (1)$$

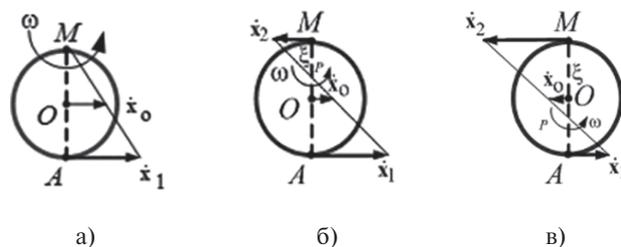


Рис. 3. Положения МЦС в различных стадиях движения

На рис. 4 обозначены силы, действующие на элементы кинематической системы, и введены обозначения:  $G_1, G_2, G_{ш}$  — вес фундамента, здания и кинематической опоры;  $F_{сц,1}, F_{сц,2}$  — силы сцепления в точках контакта;  $\ddot{x}_1(t)$  — ускорение грунта, сообщаемое фундаменту здания;  $F_T(t)$  — тормозное усилие, создаваемое гидравлическими демпферами.

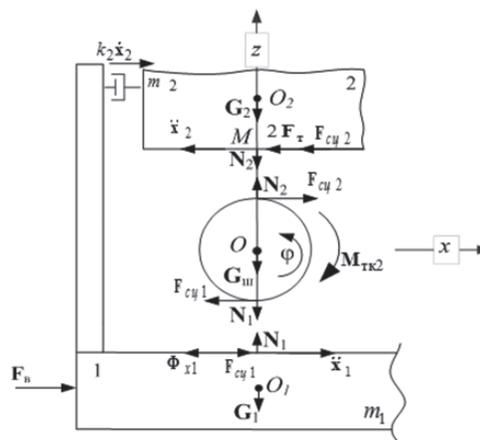


Рис. 4. Силы, действующие на несомую и несущую массы кинематической системы

Поскольку переносное движение поступательное, то кориолисово ускорение будет равно нулю. Выбрав положительное направление движения слева направо, запишем уравнения относительного движения центра масс здания по осям координат:

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_{\text{ци},2} - \Phi_{x1} + 2F_T; \quad m_2 \ddot{z}_2 = -G_2 - N_2, \quad (2)$$

где силы сцепления между телами  $F_{\text{ци},1} = \mu N_1$ ,  $F_{\text{ци},2} = \mu N_2$ ;  $\mu$  — коэффициент трения, нормальные реакции, соответственно, равны:  $N_1 = G_2 + G_{\text{ш}}$ ,  $N_2 = G_2$ ;  $\Phi_{x1} = (m_1 + m_{\text{ш}} + m_2)a_1$  — переносная сила инерции высотного сооружения.

Приняв положительное направление угла поворота против часовой стрелки, запишем уравнение моментов относительно оси, проходящей через точку МЦС шаровой опоры:

$$J_{\text{ш}} \ddot{\varphi} - \delta G_2 \varphi = F_{\text{ци},2} \xi + F_{\text{ци},1} (2r - \xi), \quad (3)$$

где  $J_{\text{ш}} = \frac{1}{2} m_{\text{ш}} r^2 + m_{\text{ш}} \xi^2$  — момент инерции шаровой опоры;  $m_2, r$  — ее масса и радиус.

В задаче, описываемой уравнениями (2) и (3), неизвестными являются: перемещение несомой массы  $x_2$ , тормозное усилие  $F_T$ , создаваемое демпферами, и положение МЦС  $\xi$ . Поскольку  $x_2$  и  $\xi$  связаны соотношением (1), данная задача замкнута.

Условием остановки виброизолированной системы в крайне правом положении является отсутствие ускорения  $\ddot{x}_1$  либо его компенсация тормозными демпферами.

Движение виброизолированной системы справа налево происходит аналогично с учетом смены знака ускорения несомой массы. В этом случае положение точки МЦС цилиндров будет меняться от точки А к М.

Результаты численного моделирования показали смещение несомой массы 30 см при смещении фундамента — 0,015 мм. При этом для удержания несомой массы необходимо прикладывать значительное тормозное усилие. Далее введены усовершенствования, которые позволяют снизить усилия в гидродемпферах.

**2. Несомая масса установлена на шарах и имеет выпуклые вверх циклоидальные выемки (рис. 5).**

Форма выемки несомой массы выбрана циклоидальной ввиду того, что при движении шара по прямой его радиус описывает циклоиду за один поворот. Таким образом, форма выемки соответствует траектории точек поверхности шара, что способствует отсутствию проскальзывания в точке контакта до момента движения юзом. Кроме того, такая форма вы-

емки способствует торможению и возврату в исходное состояние несомой массы.

Точка М участвует в сложном движении. Относительным движением является ее движение по шаровой опоре  $x_M$ , а переносным — поступательное движение центра шара  $x_e$ . В сумме эти два вектора образуют абсолютное движение (см. рис. 5).

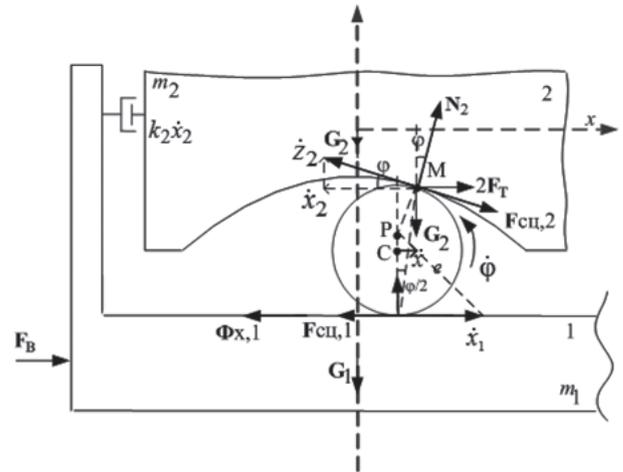


Рис. 5. Нарастание скорости здания. P — мгновенный центр скоростей шаровой опоры

Уравнения относительного движения центра масс здания имеют вид:

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_{\text{ци},2} \cos \varphi + N_2 \sin \varphi - \Phi_{x1} + 2F_T; \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -G_2 + N_2 \cos \varphi - F_{\text{ци},2} \sin \varphi,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\dot{x}_1 \xi}{2r - \xi}, \quad N_2 = \frac{G_2}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi}$$

или

$$m_2 \ddot{x}_2 = \delta G_2 \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi} + G_2 \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi} - (m_1 + m_{\text{ш}} + m_2)a_1 + 2F_T; \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -G_2 + G_2 \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi} - \delta G_2 \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi}.$$

Уравнение моментов относительно оси, проходящей через мгновенный центр скоростей шаровой опоры, имеет вид

$$J_{\text{ш}} \ddot{\varphi} - \delta G_2 \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi} \varphi = F_{\text{ци},2} \xi + F_{\text{ци},1} (2r - \xi). \quad (6)$$

После остановки несущей массы происходит скатывание несомой массы в нейтральное положение. Мгновенный центр скоростей находится в точке касания шара и несущей массы 1.

Уравнения относительного движения центра масс здания в этом случае имеют вид:

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_{cu,2} \cos \varphi + N_2 \sin \varphi + 2F_T; \quad (7)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -G_2 + N_2 \cos \varphi - F_{cu,2} \sin \varphi,$$

а вращательное движение шаровой опоры описывается тем же уравнением (6).

В дальнейшем считаем, что движение фундамента соответствует движению цилиндров, а движение здания — движению поршней гидродемпферов.

Нелинейное уравнение (6) соответствует осциллятору с квадратичной характеристикой. Ввиду того что угол отклонения шара в системе виброизоляции мал, функцию  $\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi}$  раскладываем в ряд Маклорена с сохранением двух членов ряда. Далее ищем решение параметрической задачи [21]:

$$\ddot{\varphi} - \frac{\delta G_2}{J_{ш}} (\varphi + 0,1\varphi^2) = \frac{1}{J_{ш}} [F_{cu,2} \xi + F_{cu,1} (2r - \xi)].$$

Результаты моделирования приведены на рис. 6, из которых видно, что смещение несомой массы снизилось до 2,5 см, а максимальное тормозное усилие составляет 8 кН.

**3. Несомая масса установлена на шарах и имеет выпуклые вверх циклоидальные выемки.** В несущей массе оборудованы выемки в виде брахистохроны (рис. 8).

Оборудование брахистохрон в несущей массе способствует наименьшему времени скатывания несомой массы.

В начале движения сооружение неподвижно. Мгновенный центр скоростей находится в точке M контакта несомой массы и шара. Текущее положение здания на шаровых опорах изображено на рис. 8. При этом мгновенный центр скоростей находится выше центра тяжести шара вследствие того, что скорость здания меньше скорости фундамента.

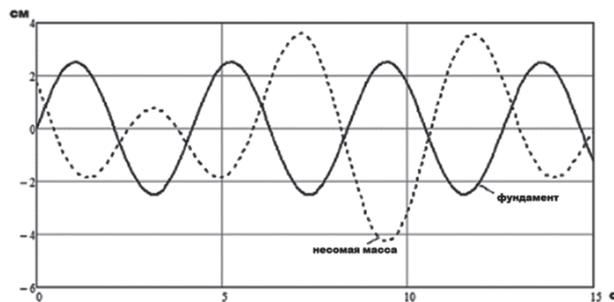


Рис. 6. Графики перемещения фундамента при наличии циклоидальной выемки

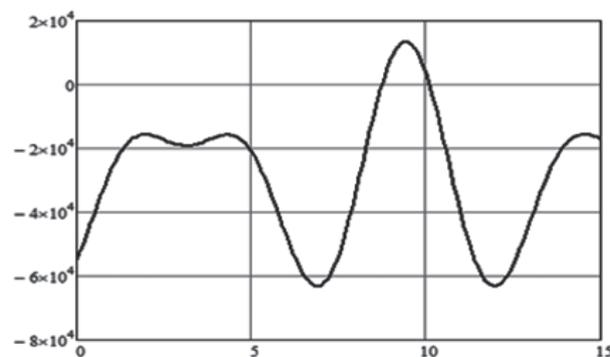


Рис. 7. Нагрузочная характеристика гидравлического привода

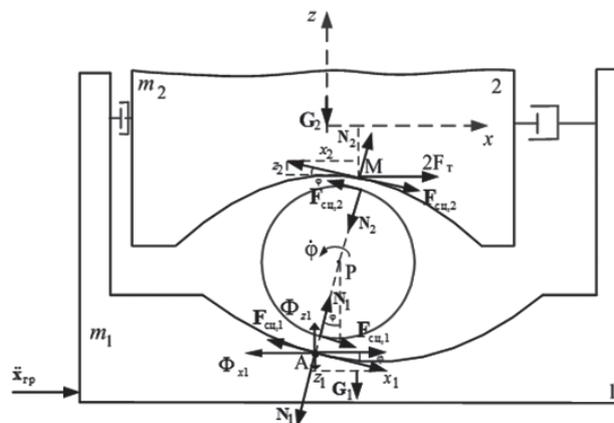


Рис. 8. Нарастание скорости здания

Уравнения относительного движения центра масс здания имеет вид:

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_{cu,2} \cos \varphi + N_2 \sin \varphi - \Phi_{x1} + 2F_T; \quad (8)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -G_2 + N_2 \cos \varphi - F_{cu,2} \sin \varphi - \Phi_{z1},$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\dot{x}_1 \xi}{2r - \xi}, \quad N_2 = \frac{G_2 - \Phi_{z1}}{\cos \varphi - \delta \sin \varphi},$$

где  $\Phi_{x1} = (m_1 + m_{ш} + m_2)a_1$  — переносная сила инерции по горизонтали;  $\Phi_{z1} = \Phi_{x1} \operatorname{tg} \varphi$  — переносная сила инерции по вертикали.

Уравнение моментов относительно оси, проходящей через мгновенный центр скоростей шаровой опоры, описывается уравнением (6).

После остановки несущей массы происходит скатывание несомой массы в нейтральное положение. Мгновенный центр скоростей находится в точке касания шара и несущей массы 1.

Уравнения относительного движения центра масс здания в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2 &= F_{\text{сн},2} \cos \varphi + N_2 \sin \varphi + 2F_r; \\ m_2 \ddot{z}_2 &= -G_2 + N_2 \cos \varphi - F_{\text{сн},2} \sin \varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

а вращательное движение шаровой опоры описывается уравнением тем же уравнением (6).

В результате моделирования данного случая сделан вывод о снижении тормозного усилия гидропривода на 30%.

Таким образом, этот вариант устройства катковой системы виброизоляции является наилучшим.

Оптимальный размера опор качения (шаров) выбирается с учетом допустимого смещения здания в горизонтальном направлении.

**Выводы.** Разработанная в данной статье динамическая модель катковой системы компенсации развивает новый метод виброзащиты гибких сооружений, работающих по основной частоте колебаний в низкочастотном диапазоне. Предложенная система компактна и эффективно снижает уровень максимальных амплитуд вынужденных колебаний высотных сооружений в указанном частотном диапазоне.

Результаты исследований, полученные в статье, представляют научный и практический интерес для специалистов в области теории колебаний. Они также могут быть использованы разработчиками катковых виброгасителей для снижения уровня вынужденных колебаний разнообразных объектов в низкочастотном диапазоне.

## Литература

1. *Легеца В.П.* Динамика виброзащитных систем с роликовым гасителем низкочастотных колебаний [Текст] / В.П. Легеца // Проблемы прочности. — 2004. — № 2. — С. 106–118.
2. *Легеца В.П.* Эффективность виброзащитной системы с изохронным роликовым гасителем [Текст] / В.П. Легеца // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2013. — № 2. — С. 65–76.
3. *Легеца В.П.* Брахистохрона для катящегося цилиндра [Текст] / В.П. Легеца // Известия РАН. Механика твердого тела. 2010. — № 1. — С. 34–41.
4. *Legeza V.P.* Dynamic model and optimal setup of a vibroprotective system // Mech. Solids. 2010. V. 45. № 2. P. 194–204.
5. *Легеца В.П.* О кривой «наискорейшего спуска» в задаче о качении однородного цилиндра [Текст] / В.П. Легеца // Прикладная механика. — 2008. — Т. 44. — № 12. — С. 131–138.
6. *Легеца В.П.* Циклоидальный маятник с катающимся цилиндром [Текст] / В.П. Легеца // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2012. — № 4. — С. 11–15.
7. *Легеца В.П.* Исследование динамического поведения нового гасителя вынужденных колебаний высотных сооружений [Текст] / В.П. Легеца // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2003. — № 5. — С. 31–38.
8. *Легеца В.П.* Численный анализ плоского движения шара в циклоидальной полости между двумя подвижными опорами [Текст] / В.П. Легеца // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2003. — № 6. — С. 12–17.
9. *Легеца В.П.* Динамика виброзащитных систем с шаровым гасителем низкочастотных колебаний [Текст] / В.П. Легеца // Проблемы прочности. — 2004. — № 3. — С. 83–94.
10. *Воронцов Г.В.* К задаче математического моделирования гасителей колебаний высотных сооружений [Текст] / Г.В. Воронцов, С.И. Евтушенко // Вестник МГСУ. — 2009. — № 1. — С. 127–131.
11. *Воронцов Г.В.* Линеаризованная модель магнитоупругости сложных мостов [Текст] / Г.В. Воронцов, С.И. Евтушенко // Известия вузов. Электромеханика. — 2009. — № 2. — С. 75–78.
12. *Воронцов Г.В.* К задаче оптимизации параметров инерционных автономных гасителей колебаний высотных сооружений [Текст] / Г.В. Воронцов, С.И. Евтушенко // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. — 2009. — № 2. — С. 81–90.
13. *Дыба В.П.* Модель колебаний высотного сооружения при взаимодействии с грунтом [Текст] / В.П. Дыба, О.А. Бурцева, С.А. Чипко // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: матер. Всерос. научно-техн. конф., г. Новочеркасск, 7–8 июня 2012 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). — Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2012. — С. 415–424.
14. *Бурцева О.А.* Колебания упругого стержня при взаимодействии с грунтом [Текст] / О.А. Бурцева, В.П. Дыба, С.А. Чипко // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т. 2. Материалы VII Международного симпозиума (11–13 сентября 2012 года, г. Непряхино Челябинской обл.). — М.: РАН, 2012. — С. 277–286.
15. *Бурцева О.А., Чипко С.А.* Система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне // Инженерный Вестник Дона. — 2014. — № 1 [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/nly2014/2249>
16. *Бурцева О.А.* Математическая модель высотного сооружения на свайном фундаменте [Текст] / О.А. Бурцева, С.А. Чипко // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. — 2014. — № 1. — С. 81–87.
17. *Бурцева О.А.* Система диагностики и мониторинга свайного фундамента средствами АСУТП [Текст] / О.А. Бурцева, С.М. Лапеев // Результаты исследований — 2017: материалы II Национальной конф. профессорско-преподава-

- тельского состава и научных работников ЮРГПУ(НПИ), г. Новочеркасск, 25–26 мая 2017 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. — Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ(НПИ), 2017. — С. 14–16.
18. Burtseva O.A., Tkachev A.N., Chipko S.A. Roller seismic impact oscillation neutralization system for high-rise buildings // *Procedia Engineering*. 2015. № 129. Pp. 259–265.
19. Бурцева О.А. Пассивная система виброкомпенсации высотного сооружения [Текст] / О.А. Бурцева, С.А. Чипко, Н.Р. Абуладзе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2017. — № 5. — С. 59–63.
20. Бурцева О.А. Устройство компенсации колебаний высотных сооружений [Текст] / О.А. Бурцева, С.А. Чипко, Н.Р. Абуладзе / Патент на изобретение 2018136670/03, 2019 г.
21. Бондарь Н.Г. Некоторые автономные задачи нелинейной механики [Текст] / Н.Г. Бондарь. — Киев: Наукова думка, 1969. — 302 с

## References

1. Legeza V.P. Dinamika vibrozashchitnyh sistem s rolikovym gasitelem nizkochastotnyh kolebanij [Dynamics of vibration protection systems with a roller damper of low-frequency vibrations]. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength]. 2004, I. 2, pp. 106–118.
2. Legeza V.P. Effektivnost' vibrozashchitnojsistemysizhronnym rolikovym gasitelem [Efficiency of a vibration protection system with an isochronous roller damper]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya RAN. Rigid Body Mechanics,]. 2013, I. 2, pp. 65–76.
3. Legeza V.P. Brahistohrona dlya katyashchegosya cilindra [Brachistochrone for a rolling cylinder]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya RAN. Rigid Body Mechanics,]. 2010, I. 1, pp. 34–41.
4. Legeza V.P. Dynamic model and optimal setup of a vibroprotective system // *Mech. Solids*. 2010. V. 45. I. 2. P. 194–204.
5. Legeza V.P. O krivoj «naiskorejshego spuska» v zadache o kachenii odnorodnogo tsylindra [On the curve of “steepest descent” in the problem of rolling of a homogeneous cylinder]. *Prikladnaya mekhanika* [Applied Mechanics]. 2008, Vol. 44, I. 12, pp. 131–138.
6. Legeza V.P. Cikloidal'nyj mayatnik s katayushchimsya cilindrom [Cycloidal pendulum with a rolling cylinder]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya RAN. Rigid Body Mechanics,]. 2012, I. 4, pp. 11–15.
7. Legeza V.P. Issledovanie dinamicheskogo povedeniya novogo gasitelya vyznuzhennyh kolebanij vysotnyh sooruzhenij [Investigation of the dynamic behavior of a new absorber of forced vibrations of high-rise structures]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya RAN. Rigid Body Mechanics,]. 2003, I. 5, pp. 31–38.
8. Legeza V.P. Chislennyj analiz ploskogo dvizheniya shara v cikloidal'noj polosti mezhdvu dvumya podvizhnymi oporamami [Numerical analysis of plane motion of a ball in a cycloidal cavity between two movable supports]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya RAN. Rigid Body Mechanics,]. 2003, I. 6, pp. 12–17.
9. Legeza V.P. Dinamika vibrozashchitnyh sistem s sharovym gasitelem nizkochastotnyh kolebanij [Dynamics of vibration protection systems with a ball absorber of low-frequency vibrations]. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength]. 2004, I. 3, pp. 83–94.
10. Voroncov G.V., Evtushenko S.I. K zadache matematicheskogo modelirovaniya gasitelej kolebanij vysotnyh sooruzhenij [On the problem of mathematical modeling of vibration dampers for high-rise structures]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2009, I. 1, pp. 127–131.
11. Voroncov G.V., Evtushenko S.I. Linearizovannaya model' magnitoprugosti slozhnyh mostov [Linearized model of magnetoelasticity of complex bridges]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Izvestiya vuzov. Electromechanics]. 2009, I. 2, pp. 75–78.
12. Voroncov G.V., Evtushenko S.I. K zadache optimizacii parametrov inercionnyh avtonomnyh gasitelej kolebanij vysotnyh sooruzhenij [On the problem of optimization of the parameters of inertial autonomous vibration dampers for high-rise structures]. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical Sciences]. 2009, I. 2, pp. 81–90.
13. Dyba V.P., Burceva O.A., Chipko S.A. Model' kolebanij vysotnogo sooruzheniya pri vzaimodejstvii s gruntom [Model of vibrations of a high-rise structure when interacting with soil]. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii: mater. Versos. nauchno-tekhn. konf., g. Novoherkassk, 7–8 iyunya 2012 g. / Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t (NPI)* [Soil mechanics in geotechnics and foundation engineering: materials of the All-Russian scientific and technical conference, Novocherkassk, June 7–8, 2012 / South-Russian State Technical University (NPI)]. Novocherkassk: YuRGU (NPI) Publ., 2012, pp. 415–424.
14. Burceva O.A., Dyba V.P., Chipko S.A. Kolebaniya uprugogo sterzhnya pri vzaimodejstvii s gruntom [Oscillations of an elastic rod when interacting with soil]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki. Materialy VII Mezhdunarodnogo simpoziuma (11–13 sentyabrya 2012 goda, g. Nepryakhino Chelyabinskoy obl.)* [Fundamental and applied problems of science. Vol. 2. Proceedings of the VII International Symposium (September 11–13, 2012, Nepryakhino, Chelyabinsk region)]. Moscow: RAN Publ., 2012, Vol. 2, pp. 277–286.
15. Burceva O.A., Chipko S.A. Sistema kompensacii kolebanij vysotnogo sooruzheniya v sejsmoaktivnoj zone [The system of compensation of vibrations of a high-rise structure in the seismic zone]. *Inzhenernyj Vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2014, I. 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2249>
16. Burceva O.A., Chipko S.A. Matematicheskaya model' vysotnogo sooruzheniya na svajnom fundamente [Mathematical model of a high-rise structure on a pile foundation]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical Sciences]. 2014, I. 1, pp. 81–87.
17. Burceva O.A., Lapeev S.M. Sistema diagnostiki i monitoringa svajnogo fundamenta sredstvami ASUTP [System for diagnostics and monitoring of the pile foundation by means of automated process control systems]. *Rezultaty issledovanij — 2017: materialy II Nacional'noj konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i nauchnyh rabotnikov YuRGPU(NPI), g. Novoherkassk, 25–26 maya 2017 g. / Yuzh.-Ros. gos. politekhn. un-t (NPI) im. M.I. Platova* [Research results — 2017: materials of the II National conf. faculty and researchers of the SRSPU (NPI), Novocherkassk, May 25–26, 2017 / Yuzh.-Ros. state polytechnic un-t (NPI) them. M.I. Platova]. Novocherkassk: YuRGPU(NPI) Publ., 2017, pp. 14–16.
18. Burtseva O.A., Tkachev A.N., Chipko S.A. Roller seismic impact oscillation neutralization system for high-rise buildings // *Procedia Engineering*, 2015. I. 129. Pp. 259–265.
19. Burceva O.A., Chipko S.A., Abuladze N.R. Pассивная система виброкомпенсации высотного сооружения [Passive vibration compensation system for a high-rise structure]. *Sejsmостойкое строitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Seismic construction. Safety of structures]. 2017, I. 5, pp. 59–63.
20. Burceva O.A., Chipko S.A., Abuladze N.R. *Ustrojstvo kompensacii kolebanij vysotnyh sooruzhenij* [Vibration compensation device for high-rise structures]. *Patent na izobretenie 2018136670/03, 2019 g.* [Patent for invention 2018136670/03, 2019].
21. Bondar' N.G. *Nekotorye avtonomnye zadachi nelinejnoj mekhaniki* [Some autonomous problems of nonlinear mechanics]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1969. 302 p.