

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №6, Том 12 / 2020, No 6, Vol 12 <https://esj.today/issue-6-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/15SAVN620.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Талалай М.В., Кочетков А.В., Шашков И.Г. Виброзащита объектов строительства на основе маятниковых систем // Вестник Евразийской науки, 2020 №6, <https://esj.today/PDF/15SAVN620.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Talalay M.V., Kochetkov A.V., Shashkov I.G. (2020). Vibration protection of construction objects based on pendulum systems. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 6(12). Available at: <https://esj.today/PDF/15SAVN620.pdf> (in Russian)

УДК 531.53

**Талалай Мария Викторовна**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
Студент  
E-mail: talalay@bk.ru

**Кочетков Андрей Викторович**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: soni.81@mail.ru

**Шашков Игорь Геннадиевич**

ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия  
Старший преподаватель  
Кандидат технических наук  
E-mail: igoshashkov@yandex.ru

## **Виброзащита объектов строительства на основе маятниковых систем**

**Аннотация.** В статье приводится анализ направлений проектирования, строительства и эксплуатации виброзащиты объектов строительства на основе маятниковых систем.

Приемы динамической защиты от ветровых нагрузок эффективны потому, что ветровые нагрузки по своей сути динамические. Ветер никогда не дует равномерно, почти всегда ветер дует порывами.

Смысл применения маятниковых гасителей в том, что колебания основного сооружения передается к маятнику гасителя, частоту собственных колебаний гасителя стараются подобрать таким образом, чтобы колебания основного сооружения и колебания гасителя проходили в противофазе.

Главный недостаток гасителя с затуханием состоит в том, что по мере снижения амплитуды колебаний, меняется и круговая частота колебаний.

В какой-то момент фазы колебаний основной конструкции и гасителя совпадают, и вместо противодействия гаситель начинает раскачивать защищаемую конструкцию.

Другим способом модификации гасителей является введение в конструкцию гасителя демпферов для гашения колебаний самого гасителя.

Приведенный обзорный материал позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными устройствами гашения колебаний сооружений мачтового типа, являются маятниковые гасители колебаний с индукционными демпферами.

Для башен и мачт применение других типов гасителей, кроме маятниковых связано с рядом недостатков.

**Ключевые слова:** демпферы; объекты строительства; гасители колебаний; эллинги; противофаза; энергия; маятник; башни; мачта; колебания; виброзащита

### Введение

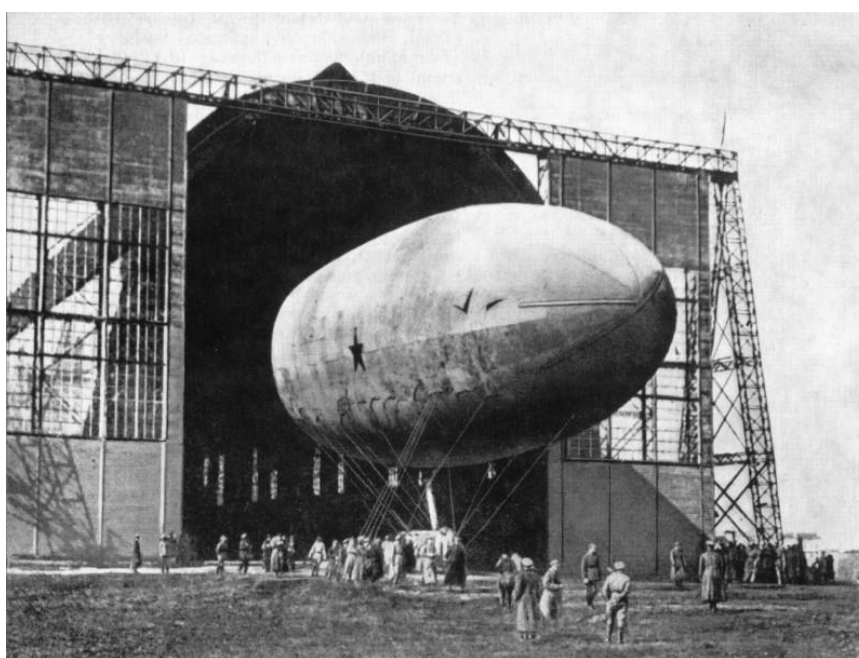
Идея статьи была в анализе возможностей проектирования и строительства систем виброзащиты для причалов дирижаблей.

Для дирижаблей применяются два типа причальных устройств: эллинги и причальные мачты.

Эллинги строятся в местах изготовления, длительного хранения, обслуживания и ремонта дирижаблей. Причальные мачты в местах кратковременных стоянок, для приема или отправки грузов, посадки или высадки пассажиров и т. д.

Были разработаны автоматические причальные устройства (безмачтовые)<sup>1</sup>, но большого применения они не получили, т. к. требовали или специального оборудования дирижаблей подъемного механизма, типа подъемной платформы, либо посадки дирижабля на землю, что требует привлечения большого количества людей и техники. Для справки, для причаливания к мачте требуется наземный экипаж в количестве 4–5 человек.

Для обслуживания посадки в эллинг требуются 200–250 человек, либо два–три десятка тракторов.



а) эллинг, источник <https://habr.com/ru/post/414971/>

---

<sup>1</sup> Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 1981. – 456 с.



б) причальная мачта, источник <https://vz.ru/society/2018/7/24/933869.html>

### **Рисунок 1. Типы причалов дирижаблей**

Причальные мачты для дирижаблей относятся к высотным сооружениям, поэтому большое значение при проектировании и строительстве причальных мачт уделяют защите от ветровых нагрузок. Причем опасность ветровых нагрузок многократно возрастает в случае, когда к мачте прикреплен дирижабль. Т.к. дирижабль имеет большую парусность, и воздействие ветра на мачту с причаленным дирижаблем намного превышает ветровую нагрузку на саму мачту без дирижабля.

### **Постановка задачи**

Казалось бы, что самый простой способ защиты от ветровых нагрузок – это увеличение прочности и остойчивости причальной мачты за счет увеличения прочности, усиления фундамента и т. д.

Подобные решения изложены в технической литературе [1–8].

Однако простой экстенсивный путь оказывается не выгодным, т.к. требует больших финансовых и трудовых затрат. Т.к., причальные мачты в основном предполагается строить в отдаленных участках, то и больших транспортных затрат, на возведение особо прочных сооружений не должно быть.

Более эффективным и экономичным является применение динамической защиты. Приемы динамической защиты от ветровых нагрузок эффективны потому, что ветровые нагрузки по своей сути динамические. Ветер никогда не дует равномерно, почти всегда ветер дует порывами.

Во-вторых, конструкция причальных мачт представляет из себя классический маятник, стержень с одним жестко закрепленным концом, а второй конец – свободный. Из механики известно, что такая конструкция при внешних механических воздействиях колеблется с частотой собственных колебаний. Соответственно, отсюда следуют и методы защиты от динамических нагрузок.

Рассмотрим некоторые типы динамической защиты. Среди механизмов, обеспечивающих динамическую защиту, различают гасители и демпферы. Чаще всего применяются совмещенные устройства: гасители с демпферами.

Демпферы – это устройства для гашения или предотвращения колебаний, путем отбора энергии колебаний устройства или сооружения. Применяются пневматические, гидравлические, насыпные и т. д. типы демпферов.

Очень хорошим демпфером, часто применяемым в строительстве, является песок. При поглощении энергии колебаний песчинки трутся друг об друга, происходит нагрев и размельчение (механическое разрушение) песчинок. Таким образом, энергия колебаний конструкции переходит в другие виды энергии. Демпферы, в сооружениях башен и мачт в чистом виде не применяются.

В гасителях колебаний используется немного другой механизм снижения колебаний.

Гаситель – это устройство, обеспечивающий снижение колебаний за счет создания сил противодействующее колебаниям защищаемого устройства или сооружения. Смысл применения маятниковых гасителей в том, что колебания основного сооружения передается к маятнику гасителя, частоту собственных колебаний гасителя стараются подобрать таким образом, чтобы колебания основного сооружения и колебания гасителя проходили в противофазе.

Несмотря на эффективность маятниковых гасителей без затухания, подобные гасители колебаний применяются крайне редко. Все дело в том, что частоты собственных колебаний строительных конструкций, типа башен и мачт очень низкие.

Чтобы изготовить свободный маятник на такие частоты необходимо иметь очень длинный подвес маятника.

При этом еще и амплитуда такого маятника оказывается достаточно значительной, по крайней мере, несколько метров.

Для использования такого гасителя необходимо иметь достаточно много свободного пространства, которое занимает маятник и уменьшает полезное пространство.

Для уменьшения размеров конструкции гасителя применяются несколько модификаций [9].

Например, используются ударные гасители (рис. 2).

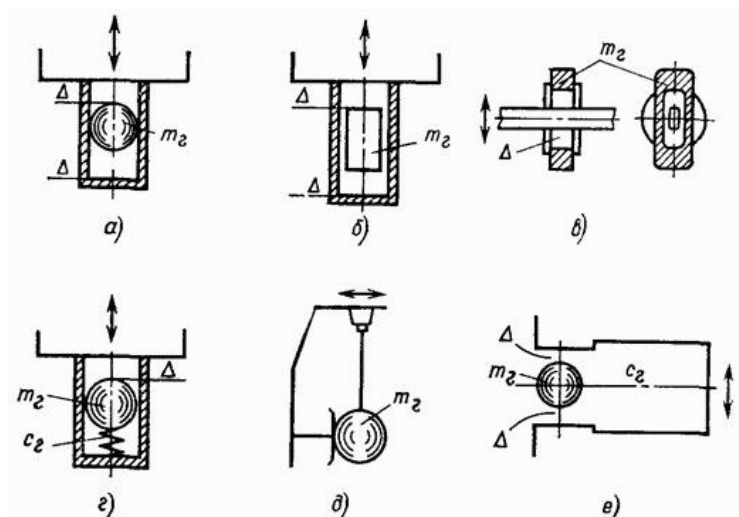
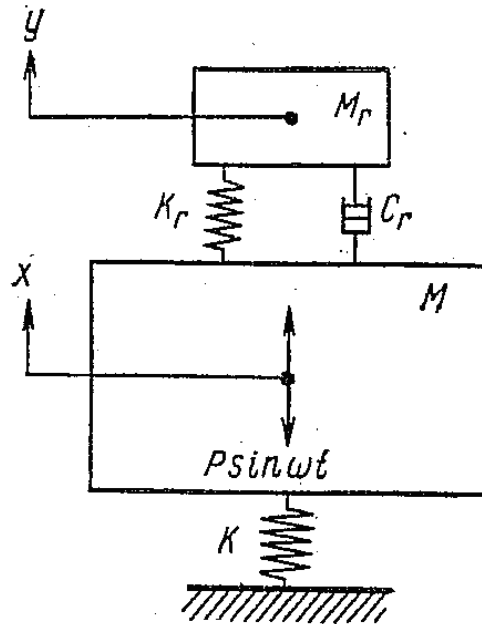


Рисунок 2. Типы ударных гасителей (источник [10])

Принцип работы ударных гасителей состоит в том, что частоты колебаний защищаемой конструкции и присоединенной массы гасителя различаются настолько, что в момент удара, направления скоростей защищаемой конструкции и гасителя противоположны.

Другим способом модификации гасителей является введение в конструкцию гасителя демпферов. В конструкцию гасителя вводятся демпфирующие устройства для гашения колебаний самого гасителя. На рис. 3 приведена структурная схема гасителя колебаний с демпфером.



**Рисунок 3.** Схема работы гасителя колебаний с демпфером ( $M$  – масса основного сооружения;  $M_r$  – присоединенная масса гасителя;  $K$  – упругое основание конструкции;  $K_r$  – упругое соединение гасителя;  $C_r$  – демпфер) (источник [10])

### Анализ демпферных устройств

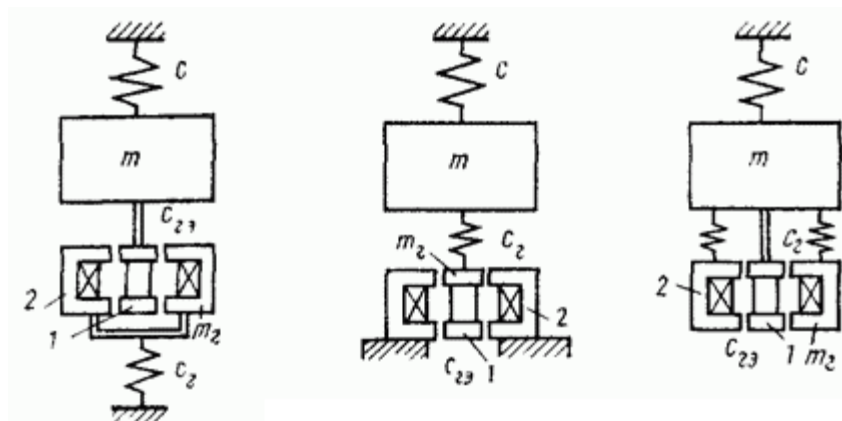
В качестве демпферных устройств применяют пневматические, гидравлические демпферы. Имеются демпферы, работающие на сухом трении. Главный недостаток гасителя с затуханием состоит в том, что по мере снижения амплитуды колебаний, меняется и круговая частота колебаний (рис. 4). В какой-то момент, фазы колебаний основной конструкции и гасителя совпадают, и вместо противодействия гаситель начинает раскачивать защищаемую конструкцию.



**Рисунок 4.** Затухающие и апериодические колебания (рисунок автора)

Для компенсации негативных последствий применения гасителей с демпферами применяется активное управление гасителями. Наиболее простое и эффективное управление имеют электромагнитные схемы управления демпфированием. Активное управление в пневматических, гидравлических и других схемах демпфирования оказываются достаточно сложными.

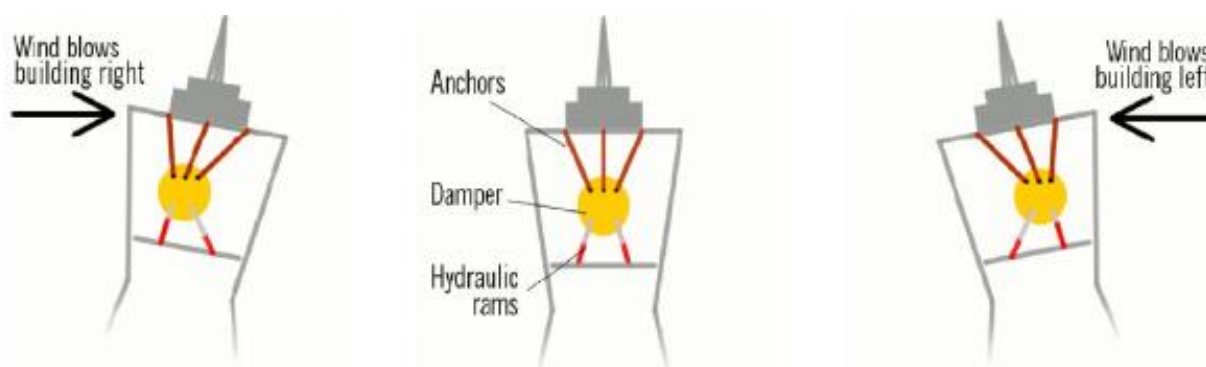
Несмотря на простоту конструкции подобных демпферов, схемы управления ими достаточно сложны, поэтому управляемые демпферы чаще используют схемы электромагнитного управления ими (рис. 5).



**Рисунок 5.** Схемы активного гашения колебаний электромагнитными демпферами (источник [10])

Оригинальное решение активного электромагнитного гашения колебаний применено в Шанхайской башне.

На верхних этажах небоскреба установили тщательно рассчитанную массу – самый тяжелый груз, какой когда-либо использовался в архитектурных демпферах (рис. 6) – и связали ее с мощным электромагнитом, создав первый в истории строительства индукционный демпфер.



**Рисунок 6.** Движения демпфера при раскачивании башни (источник<sup>2</sup>)

Принципиальное отличие решения в Шанхайской башне, является то, что применение индукционного демпфера не требует управления. Необходимое демпфирование происходит без участия человека.

<sup>2</sup> Самый стойкий небоскреб // Популярная механика. № 5, 2015.

«Сердцем» устройства служит медная пластина площадью 100 м<sup>2</sup>, на нее установлено 125 мощных магнитов, и вся эта конструкция расположена под подвешенным демпфером классического типа.

Когда здание сдвигается, 1000-тонный стальной груз движется над магнитами, вызывая появление электрического тока в пластине.

Это, в свою очередь, создает сопротивляющееся движению демпфера магнитное поле, увеличивая демпфирующий эффект.

При этом никакого активного контроля над системой не требуется, поскольку вся работа демпфера определяется правилом Ленца: «Индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток».



**Рисунок 7.** Фото индукционного демпфера башни Тайбэй в Шанхае (источник [10])

Интересно предложение Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН о применении гидравлических демпферов, основанных на гидро-пневмодинамических эффектах гашения колебаний за счет перемещения рабочей среды в каналах и полостях рассчитанной формы<sup>3</sup>.

На основе эффекта разработаны и массово выпускаются гасители колебаний для автомобильной и дорожно-строительной техники (ФРГ, Россия). При этом жидкость выступает качестве масс-инерционной и диссипативной компоненты гидропоры. Впервые гидропоры начали успешно применяться в автомобилестроении Германии в начале 80-х годов. Затем они нашли широкое применение в автомобильной и авиационной промышленности США и Японии. Общее количество патентов на гидропоры лишь в США с 1985 по 1995 годы, превышает 1000.

Институтом машиноведения РАН имени А.А. Благонравова исследованы различные типы гидропор и элементы межкамерной перегородки в них. На рисунке 8 обозначены: 1 – корпус; 2 – обечайка; 3 – рабочая камера; 4 – перегородка; 5 – дроссельный канал;

---

<sup>3</sup> Мугин, О.О. Теоретическое и экспериментальное исследование и разработка гидропор силовых агрегатов машин. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Специальность 05.02.18. 2008. – 167 с.

6 – инерционный канал; 7 – мембрана нижняя; 8 – поддон; 9 – газовая полость 10 – нижняя камера; 11 – промежуточная мембрана.

Конструкция гидроопоры (рис. 8) представляет собой герметичную емкость, заполненную гидравлической жидкостью и ограниченную опорной платой, обечайкой, корпусом и нижней мембраной. Внутри находятся две камеры: рабочая и промежуточная, разделенные между собой перегородкой.

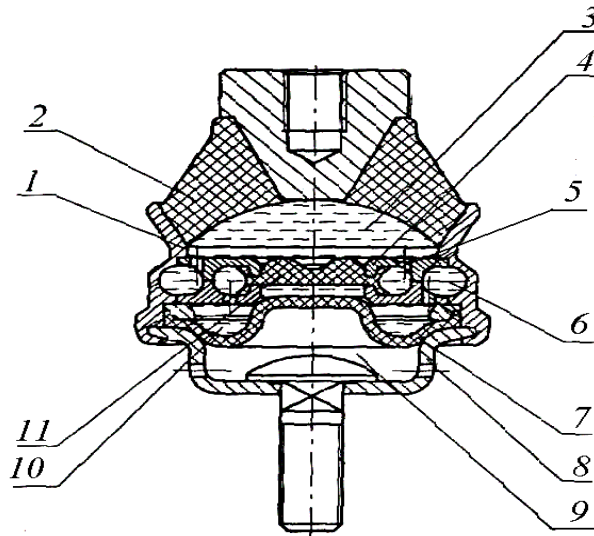
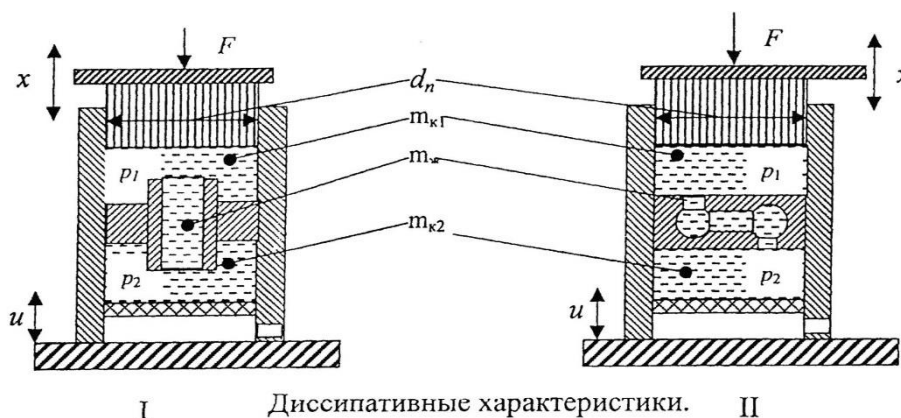


Рисунок 8. Конструкция гидроопоры (источник<sup>3</sup>)

Гашение вибрации происходит с помощью жидкости, которая заполняет собой внутреннюю полость гидроопоры, за счет совершения работы по перемещению жидкости из одной камеры в другую. При этом возникают инерционные эффекты и происходит трение слоев жидкости, вырабатывается тепловая энергия, которая распределяется в окружающее пространство.

Механизм гашения вибраций основан на использовании инерционных свойств жидкости (рис. 9).



A – Площадь поршня.  
a – Площадь поперечного сечения трубки.

Рисунок 9. Анализ механизма гашения вибрации (источник<sup>3</sup>)

Исследованы условия кинематической связанности абсолютного и относительного движения жидкости в форме уравнений Лагранжа второго рода, для кинетической энергии. При исследовании рассмотрены инерционные составляющие уравнений Лагранжа через



кинетическую энергию. Дополнительно можно отметить, что используемые эффекты не подчиняются классической механике Ньютона [1]. При этом добиваются, что передаточная функция по силе и кинематическая передаточная функция оказываются равны.

### Выводы

Приведенный обзорный материал позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными устройствами гашения колебаний сооружений мачтового типа, являются маятниковые гасители колебаний с индукционными демпферами.

Для башен и мачт применение других типов гасителей, кроме маятниковых связано с рядом недостатков.

Так ударные гасители при необходимости иметь большие массы гасителей, приводят к местным разрушениям конструкции.

Свободные маятники, без демпферов, приводят к большим амплитудам колебаний маятника, т. к. частоты собственных колебаний строительных конструкций низкие. Что требует применять маятники на длинных подвесах, для получения низких частот.

Применение различных типов демпферов для маятниковых гасителей, в частности, гидравлических, приводят к быстрому рассогласованию собственных колебаний конструкции и гасителя.

Пневматические демпферы в строительных конструкциях не применяются, в связи с малыми демпфирующими свойствами для больших масс.

Для гидравлических гасителей активное управление коэффициентом жесткости маятника оказывается слишком сложным, поэтому гидравлические демпферы применяются только пассивные, без активного управления. То же относится и к демпферам сухого трения.

Эффективными являются электромагнитные демпферы. В виду сравнительно легкого управления коэффициентом жесткости системы маятника. Таким образом появляется возможность активного управления демпфированием.

Самыми эффективными являются индукционные демпферы. Их главное преимущество в отсутствии необходимости вмешательства человека или вычислительных устройств.

Управление происходит автоматически, т. к. по правилу Ленца, чем выше скорость колебания, тем больше индукционные токи, а значит и выше сопротивление раскачиванию маятника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кочетков А.В., Федотов П.В. Проблемы гармонизации радикальных противоречий в аксиоматике естественных наук. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
2. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. – М.: Высшая школа, 1975. – 256 с.
3. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У Колебания в инженерном деле. – М.: Ozon.ru, 2006 – 472 с.
4. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки. – М.: Наука 1987. – 352 с.
5. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
6. Лавровский Э.К., Формальский А.М. Оптимальное управление раскачиванием и торможением двузвенного маятника // ПММ, 2001, Т. 65, вып. 2.
7. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У Колебания в инженерном деле. – М.: Ozon.ru, 2006 – 472 с.
8. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 1981. – 456 с.
9. Ионов П. Дирижабли и их военное применение. – М.: Государственное военное издательство, 1933. – 65 с.
10. Коренев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний. – М.: Наука, 1988. – 304 с.
11. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.

**Talalay Mariya Viktorovna**

Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russia  
E-mail: talalay@bk.ru

**Kochetkov Andrey Viktorovich**

Perm national research polytechnical university, Perm, Russia  
E-mail: soni.81@mail.ru

**Shashkov Igor Gennadiyevich**

Military and air academy of a name of professor N.E. Zhukovskogo and Yu.A. Gagarin, Voroneg, Russia  
E-mail: igoshashkov@yandex.ru

## **Vibration protection of construction objects based on pendulum systems**

**Abstract.** The article analyzes the directions of design, construction and operation of vibration protection of construction objects based on pendulum systems.

Dynamic wind load protection techniques are effective because wind loads are inherently dynamic. The wind never blows evenly, almost always the wind blows in gusts.

The meaning of pendulum vibration that vibrations of the main structure is transmitted to the pendulum damper, the natural frequency of the damper trying to find so that vibrations of the main structure and vibrations of the damper are held in antiphase.

The main disadvantage of a dampener with attenuation is that as the amplitude of vibrations decreases, the circular frequency of vibrations also changes.

At some point, the oscillation phases of the main structure and the damper coincide, and instead of counteracting the damper begins to rock the protected structure.

Another way to modify the dampers is to introduce dampers into the design of the dampener to dampen the vibrations of the dampener itself.

The given review material allows us to conclude that the most promising devices for damping vibrations of mast-type structures are pendulum dampers with induction dampers.

**Keywords:** dampers; construction objects; vibration dampers; boathouses; antiphase; energy; pendulum; towers; mast; vibrations; vibration protection