



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 6
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(6)

Научная статья
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003186
EDN: BLEOZB

Нелинейные колебания высотного сооружения с динамическим гасителем колебаний

М. М. Мирсаидов^{1,2}, А. Н. Ишматов¹, Б. Ш. Юлдошев¹,
Ш. М. Салимов³, И. О. Хазраткулов¹✉

¹Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров
иригации и механизации сельского хозяйства», Узбекистан

²Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М. Т. Уразбаева
Академии наук Узбекистана, Узбекистан

³Ташкентский университет прикладных наук, Узбекистан
E-mail: mirsaidov1948@mail.ru, ribs@mail.ru, Baxtiyor_yuldashev68@mail.ru,
salimovshoolim@gmail.com, ✉islomjon.xazratqulov093@gmail.com

Поступила в редакцию 4.04.2025, принята к публикации 5.06.2025,
опубликована онлайн 9.07.2025, опубликована 28.11.2025

Аннотация. Цель. Исследование динамического поведения высотных сооружений с динамическим гасителем колебаний при различных кинематических воздействиях с учетом нелинейно-упругих, вязкоупругих, упругопластических свойств материала сооружения и вязкоупругих свойств гасителя колебаний. Динамические гасители колебаний позволяют использовать их как на стадии проектирования, разработки и создания конструкций, так и в случае выявления недостатков качества конструкций в процессе их эксплуатации, и настройка позволяет просто получить желаемый эффект уменьшения уровня колебаний. Методы. Предложена математическая модель, методика и алгоритм для оценки динамического поведения высотных сооружений с динамическим гасителем колебаний с учетом нелинейных свойств материала при реальном характере работы сооружения. Для учета внутренней диссипации в материале сооружения используется нелинейная наследственная модель вязкоупругости Больцмана–Вольтерры и упругопластические свойства на основе билинейной диаграммы, характеризуемая петлей гистерезиса, описывающей зависимость реакции сооружения от деформации, представленной в виде параллелограмма. Результаты. Исследованы вынужденные колебания высотных сооружений вблизи резонансного режима с учетом линейно-, нелинейно-упругих, вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения с динамическим гасителем колебаний при различных кинематических воздействиях в основании. Достоверность методики проверялась тестовым примером с рассмотрением реакции упругопластической рамы как системы с одной степенью свободы при заданной нагрузке. Выявлен эффект гашения колебаний высотного сооружения при учете нелинейно-вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения совместно с вязкоупругим динамическим гасителем колебаний. Заключение. Установлено влияние диссипативных свойств материала на колебания сооружения. Предложены рекомендации для оптимизации работы сооружения с учетом динамического гасителя колебаний. Выявлена эффективность гашения колебаний высотного сооружения при учете нелинейно-вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения совместно с вязкоупругим динамическим гасителем колебаний.

Ключевые слова: высотное сооружение, кинематическое воздействие, нелинейно-упругие, вязкоупругие и упругопластические свойства материала, динамический гаситель колебаний, метод конечных элементов, резонансный режим.

Для цитирования: Мирсаидов М. М., Ишматов А. Н., Юлдошев Б. Ш., Салимов Ш. М., Хазраткулов И. О. Нелинейные колебания высотного сооружения с динамическим гасителем колебаний // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 6. С. 804–822. DOI: 10.18500/0869-6632-003186. EDN: BLEOZB

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Article

DOI: 10.18500/0869-6632-003186

Nonlinear vibrations of a high-rise structure with a dynamic vibration damper

M. M. Mirsaidov^{1,2}, A. N. Ishmatov¹, B. Sh. Yuldashev¹, Sh. M. Salimov³, I. O. Khazratkulov¹✉

¹The National Research University

«Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers», Uzbekistan

²Institute of Mechanics and Seismic stability of structures named after M. T. Urazbaev,

Uzbekistan Academy of Sciences, Uzbekistan

³University Tashkent for Applied Sciences, Uzbekistan

E-mail: mirsaidov1948@mail.ru, ribs@mail.ru, Baxtiyor_yuldashev68@mail.ru,
salimovshoolim@gmail.com, ✉islomjon.xazratqulov093@gmail.com

Received 4.04.2025, accepted 5.06.2025, available online 9.07.2025, published 28.11.2025

Abstract. Objective. To study the dynamic behavior of high-rise structures with dynamic oscillation dampers under various kinematic influences, taking into account the nonlinear elastic, viscoelastic, and elastoplastic properties of the structure's material and the viscoelastic properties of the oscillation damper. Dynamic oscillation dampers can be used both at the stage of design, development and construction of structures, as well as in cases where structural quality deficiencies are identified during operation. Their adjustment allows for a simple way to achieve the desired effect of reducing oscillation levels. Methods. A mathematical model, methodology, and algorithm are proposed for evaluating the dynamic behavior of high-rise structures equipped with a dynamic vibration absorber, taking into account the nonlinear properties of materials under actual operating conditions. To account for internal dissipation in the structure's material, a nonlinear hereditary Boltzmann–Volterra viscoelasticity model is employed, along with elastic-plastic properties based on a bilinear diagram. This model is characterized by a hysteresis loop, which describes the relationship between the structure's response and deformation, represented in the form of a parallelogram. Results. The forced vibrations of high-rise structures near the resonance mode were investigated taking into account the linear, nonlinear elastic, viscoelastic and elastic-plastic properties of the structure material with a dynamic vibration damper under various kinematic effects in the base. The reliability of the method was verified by a test example considering the reaction of an elastic-plastic frame as a system with one degree of freedom under a given load. The effect of vibration damping of a high-rise structure was revealed taking into account the nonlinear viscoelastic and elastic-plastic properties of the structure material together with a viscoelastic dynamic vibration damper. Conclusion. The influence of the material's dissipative properties on the structure's oscillations has been established. Recommendations for optimizing the structure's performance, taking into account the dynamic oscillation damper, have been proposed. The effectiveness of damping oscillations in a high-rise structure has been demonstrated, considering the nonlinear viscoelastic and elastoplastic properties of the structure's material in conjunction with a viscoelastic dynamic oscillation damper.

Keywords: height structure, kinematic impact, nonlinear elastic, viscoelastic and elastic-plastic properties of the material, dynamic oscillation damper, finite element method, resonance mode.

For citation: Mirsaidov MM, Ishmatov AN, Yuldashev BSh, Salimov ShM, Khazratkulov IO. Nonlinear vibrations of a high-rise structure with a dynamic vibration damper. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(6):804–822. DOI: 10.18500/0869-6632-003186

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Проблема уменьшения уровня колебаний конструкций возникает в различных областях техники, промышленного и гражданского строительства, тяжелого, транспортного, энергетического машиностроения и др. При этом в первую очередь требуется выполнение технологических требований, предъявляемых условиями эксплуатации, защиты конструкций и сооружений от вредного действия вибраций.

К настоящему времени известны различные методы и средства борьбы с недопустимыми колебаниями конструкций, в частности, изменение жесткости и инерционных параметров конструкции в целях отстройки от резонансов; повышение демпфирующих свойств путем использования материалов и конструкций с высокой поглощающей способностью, например, специальных покрытий; применение виброзоляции и разнообразных гасителей колебаний. Каждый из упомянутых способов имеет, естественно, свою рациональную область применения. Гасители в этом перечне занимают особое место благодаря тому, что их использование может быть предусмотрено не только на стадии проектирования и создания конструкций, но и в случае, когда неудовлетворительные динамические качества конструкции выявлены уже в процессе ее эксплуатации. Достоинством гасителей является также то, что при сравнительно малых затратах дополнительного материала они позволяют относительно просто получить желаемый эффект уменьшения уровня колебаний.

Динамическим гасителем колебаний (ДГК) называют устройство, в котором возникает сила инерции, уменьшающая уровень колебаний защищаемой конструкции. Чаще всего ДГК выполняется в виде дополнительной массы, присоединенной с помощью упругого и демпфирующего элементов к защищаемой конструкции. Масса гасителя представляет собой твердое тело, к которому могут присоединяться съемные грузы, упругую конструкцию и контейнер, заполненный отдельными грузами, сыпучими материалами, жидкостью. В качестве упругих элементов используются стальные пружины, резиновые элементы, упругие стержни или пластины. Для рассеяния энергии применяются материалы с повышенными диссипативными свойствами.

Основные направления исследований в области виброгашения связаны с оптимизацией параметров и оценкой эффективности ДГК в стационарных и переходных режимах при различных динамических воздействиях: исследование эффективности усложненных линейных и нелинейных ДГК; определение рациональной области применения ДГК для реальных конструкций, которые имеют достаточно простые и весьма сложные расчетные схемы; разработка эффективных методов расчета конструкций с присоединенными ДГК; методы оптимизации параметров ДГК; создание новых технологических решений ДГК, обладающих требуемыми динамическими качествами.

Целью данной работы является разработка методики и алгоритма решения задачи о вынужденных колебаниях высотных сооружений, обладающих неупругими свойствами материала с ДГК, исследование динамики конкретных сооружений с использованием ДГК и анализ полученных результатов с точки зрения обнаружения эффективных условий эксплуатации.

Проблеме расчета сооружений с ДГК на стационарные и нестационарные воздействия с учетом возникновения в конструкции различных видов деформаций посвящены многочисленные научные работы. Остановимся на тех из них, которые непосредственно представляют интерес при оценке эффективного гашения колебаний сооружения с помощью ДГК.

К таким научным работам относятся следующие.

- В работе [1] рассматривается новая конструкция системы гашения вибраций для снижения ветровых колебаний стальных дымовых труб и других тонких конструкций. Предлагается система демпфирования с использованием стандартных гидравлических демпферов, закрепленных между дымовой трубой и крышей здания электростанции, на которой она расположена. В качестве примера приводится стальная дымовая труба высотой 125 м и диаметром 4.6 м в г. Ганновере (Германия). С помощью анализа методом конечных элементов было проведено численное моделирование дымовой трубы с демпферами в виде балочных элементов и определены коэффициент демпфирования системы и амплитуды колебаний.

- В работе [2] приведен эффект интерференции между двумя высокими круглыми дымовыми трубами, расположенными на различных межосевых расстояниях и углах падения. Целью работы является количественная оценка усиления ветровой нагрузки и динамических реакций

конструкции, чтобы предоставить рекомендации по проектированию расстояния между дымовыми трубами и их ориентации. В исследовании смоделирована 200-метровая бетонная дымовая труба переменного сечения в масштабе 1:200, получены коэффициенты интерференции для поверхностного давления как отношение нагрузок между изолированным случаем и расположением со второй, соседней трубой.

• В работе [3] представлена численная схема объединения трех моделей для оценки эффективности настроенных жидкостных демпферов в снижении ветровых колебаний тонких конструкций. Основные преимущества численной схемы включают: прямое моделирование нелинейного взаимодействия жидкости и конструкции, эффективное виртуальное тестирование нескольких конфигураций жидкостных демпферов, применимость к различным конструкциям и ветровым явлениям.

• В работе [4] исследованы высокие железобетонные дымовые трубы, которые представляют собой тонкие конструкции, чувствительные к динамическим ветровым нагрузкам. Рассмотрены демпферы с настроенной массой, устанавливаемые в конструкциях для снижения нежелательных колебаний при динамических нагрузках. Произведен динамический анализ ветра двух дымовых труб высотой 200 и 220 м с помощью вычислительной гидродинамики в ANSYS. Исследование показало, что правильно спроектированные системы из нескольких демпферов с оптимальным соотношением масс могут эффективно снизить вызванные ветром вибрации высоких тонких дымовых труб более чем на 20%.

• В работе [5] приведена оценка стальных дымовых труб, уязвимых к вихревым колебаниям, и осуществление их контроля с помощью аэrodинамических гасителей колебаний. Конструкция гасителя колебаний расположена в верхней части цилиндрической стальной дымовой трубы высотой 85 м. Исследование успешно продемонстрировало возможность определения ветровой нагрузки и количественной оценки эффективности борьбы с вихрями, что стало возможным благодаря испытаниям динамического гасителя дымовых труб в аэродинамической трубе.

• В работе [6] рассмотрена солнечная дымовая труба на основе инновационной концепции, направленной на получение возобновляемой энергии за счет использования солнечного излучения. Высотная железобетонная башня находится в центре большого солнечного коллектора. Солнечный свет нагревает воздух под коллектором, и в результате конвекции воздух поднимается вверх через башню. Поток воздуха приводит в движение ветряные турбины у основания башни, вырабатывая электроэнергию. Данна оценка коэффициента демпфирования башни и характеристика ожидаемых условий ветровой нагрузки, включая турбулентность и направленный сдвиг.

• В работе [7] исследуются промышленные дымовые трубы, подверженные колебаниям, вызываемым ветром, как в направлении линии, так и поперек ветра. Резонанс может возникать из-за колебаний скорости, взаимодействующих с динамическими свойствами дымовой трубы. Рассмотрены математические модели и подходы для количественной оценки этих ветровых эффектов. Анализ аэродинамических коэффициентов и предположений о соотношении балки и оболочки показывает влияние на профили ветровой нагрузки и распределение напряжений. Результаты указывают на необходимость более точного определения таких параметров, как демпфирование и предельные значения амплитуды при учете формы мод и масштабов турбулентности.

• В работе [8] анализируются ветровые колебания 75-метровой конструкции дымовой трубы на Мадагаскаре с помощью вязкоупругих демпферов. Моделирование конструкции дымовой трубы конечными элементами выполнено с элементами вязкоупругого демпфера. Динамический анализ показывает, что вязкоупругие демпферы эффективно снижают вызванные ветром динамические реакции дымовой трубы, особенно реакции смещения, которые снижаются более чем на 36% при оптимизированном их размещении.

• В работе [9] рассматривается использование виброгасителей для снижения колебаний, вызываемых ветром в дымовых трубах. Амплитуду резонансных колебаний можно ограничить

с помощью системы демпфера с настроенной массой, оптимальной массой, жесткостью и демпфированием. Дымовая труба моделируется как система с одной степенью свободы. Приведены примеры конкретных систем демпфирования, используемых на практике, таких как демпфер Третнера с масляным демпфером.

- В работе [10] исследуется динамическое поведение и анализ высоких железобетонных дымовых труб. Высотная дымовая труба высотой 275 м смоделирована в STADD Pro с использованием балочных и пластиначатых элементов. Анализ позволил определить собственные частоты и формы мод дымовой трубы. Первые две частоты составили 0.252 Гц и 1.055 Гц.

- В работе [11] рассматривается использование настроенных массовых демпферов для снижения сейсмической реакции железобетонной дымовой трубы высотой 265 м, подверженной импульсным подземным воздействиям, близким к разрушению. Импульсные движения грунта с импульсами скорости являются критическими для высоких тонких конструкций. Исследованы три схемы демпферов — одиночный, несколько демпферов с равной жесткостью и несколько демпферов с равными массами. Дымовая труба моделировалась как 30 балок Эйлера–Бернулли с единичными массами. Результаты показали, что, когда период импульса близок к периоду колебаний дымовой трубы, достигается снижение смещения на 10...35%.

- В работе [12] исследуются высотные железобетонные дымовые трубы, подверженные колебаниям, вызываемым ветром, которые приводят к повреждению конструкции. Демпферы с настроенной массой используются для контроля этих колебаний. Демпферы работают за счет дополнительной небольшой массы, прикрепленной к конструкции с помощью пружин и демпферов. Дымовая труба высотой 180 м с различным диаметром и толщиной анализируется на ветровые и сейсмические нагрузки. Динамический анализ показывает, что добавление демпфера снижает смещения на 23 % по сравнению с исходной конструкцией. Исследование показывает, что демпферы эффективно снижают вызванные ветром колебания в высотных дымовых трубах.

- В работе [13] рассмотрены стальные дымовые трубы как тонкие конструкции, подверженные колебаниям, вызванным ветром. Для подавления резонанса устанавливаются виброгасители. Демпферы, настроенные на собственную частоту дымовой трубы, состоят из небольшой добавочной массы на пружине и толкателе и ограничивают колебания. Исследованы ветровые колебания двух тонких труб высотой 60 м и 120 м. Регулировка массы демпфера смешила частоту в сторону от резонанса, а увеличение демпфирования снизило амплитуду.

- В работе [14] дан обзор высотных сооружений, подверженных явлению, известному как резонанс вихрей. Резонанс происходит, когда вихри, действующие на конструкцию по частоте, совпадают с одной из собственных частот конструкции, вызывая его колебания. Если не принять надлежащих мер, этот резонанс может привести к усталости и даже катастрофическому разрушению. Рассмотрены различные варианты смягчения указанных проблем. Указано, что методы динамического анализа и испытания в аэродинамической трубе, моделирование вычислительной гидродинамики и конечно-элементное моделирование позволяют понять влияние ветра и получить инструменты для оценки и устранения потенциальных резонансных условий.

- В работе [15] исследованы динамические характеристики и обновление модели кирпичного дымохода высотного сооружения с помощью вибрационных измерений. Были определены частоты первых форм, коэффициенты демпфирования и формы мод. Начальные частоты имели погрешность до 24% по сравнению с экспериментами, что указывает на чрезмерную жесткость аналитической модели. Динамическая идентификация и обновление моделей позволили количественно оценить модальные свойства дымовой трубы и выявить скрытые повреждения.

- В работе [16] исследовано использование динамических демпферов для снижения колебаний высотных зданий. Описывается применение вязкоупругих материалов для создания демпфирующих элементов, а также математические модели, используемые для их расчета.

Результаты моделирования показали, что применение динамических демпферов может значительно уменьшить амплитуду колебаний здания и повысить его устойчивость в условиях сильных внешних воздействий, таких как землетрясения.

- В работах [17–19] приведены исследования динамики различных осесимметричных конструкций с учетом нелинейных упругих и вязкоупругих свойств материалов сооружений. Определены собственные частоты, декременты колебаний, амплитудно-частотные характеристики рассмотренных сооружений при стационарных кинематических воздействиях и выявлены некоторые механические эффекты, возникающие при оценке динамики сооружений.

- В работе [20] рассматривается новый разработанный вертикальный стальной трубчатый демпфер, который обладает большой боковой жесткостью и отличной способностью рассеивать энергию при землетрясениях. Улучшенные эксплуатационные характеристики конструкции проверяются аналитически с помощью четырехэтажной стальной рамки моментов, оснащенной стальными трубчатыми демпферами. Демпферы размещаются между любыми двумя точками, где при действии землетрясения существует большое относительное движение. Нелинейный динамический анализ конструкции с использованием программного обеспечения PERFORM-3D показал значительную выгоду от оснащения конструкции стальными трубчатыми демпферами. Сооружения, правильно спроектированные с демпферами, требуют лишь минимального осмотра после землетрясения и ограниченного ущерба.

- В работе [21] предлагается модифицированная конструкция трубчатого демпфера, называемая X-образным трубчатым демпфером (ХПД). Демпфер изготавливается путем соединения двух противоположно расположенных половин трубы, образуя сердечник X-образной формы, который затем болтами крепится к соединительным пластинам. Циклические испытания были проведены на 5 болтовых ХПД и 2 сварных ХПД для изучения закономерностей развития прочности, гистеретических характеристик, способности рассеивать энергию и режимов отказа. Экспериментальные результаты показали, что болтовые ХПД могут обеспечивать хорошую пластичность и стабильные гистеретические отношения как при стандартном циклическом протоколе, так и при усталостном циклическом протоколе. Соединенные половинки труб могут успешно образовывать режимы упругого крепления и увеличивать индуцированную вторичную прочность при больших боковых перемещениях. Сварные ХПД обладали более слабой энергорассеивающей способностью из-за ранних отказов трещин, но они могут обеспечивать более высокую жесткость и упругую консистенцию.

- В работе [22] изучено новое пассивное энергодиссилиативное устройство при землетрясениях, называемое двухтрубным демпфером (ДТД). Устройство состоит из двух труб, сваренных в выбранных местах и работающих на сдвиг. Неупругая циклическая деформация рассеивает энергию в основном за счет изгиба корпуса трубы. Однако при больших перемещениях в середине устройства образуется диагональ натяжения, которая дополнительно добавляет жесткость и прочность. Прочность, жесткость и диссиляция энергии ДТД составляют более двух ранее изученных одиночных трубчатых демпферов. Циклические квазистатические испытания были проведены на четырех образцах ДТД. Хорошая пластичность, поглощение энергии и стабильные петли гистерезиса наблюдались у всех образцов. Разработана модель конечного элемента, учитывающая нелинейность, большую деформацию, контакт и повреждение материала, для проведения параметрических исследований на различных размерах труб. Зависимости, определяющие поведенческие характеристики ДТД, приведены для любого размера трубы.

- В работе [23] исследуются характеристики настроенного массового демпфера (НМД), установленного в трубе высотой 183 м, расположенной на краю другой трубы. Даны численные и экспериментальные результаты. Для симуляций действие ветра рассматривается путем решения

нескольких двухмерных задач потока на выбранном количестве горизонтальных плоскостей в поперечном направлении к стекам. На таких плоскостях решаются уравнения Навье–Стокса для оценки действия жидкости в различных положениях дымоходов и применяются стандартные методы интерполяции в вертикальном направлении. Для рассмотрения движущейся области используется произвольный лагранж–эйлеровский подход, а для решения поля жидкости используется дробно–шаговая схема. Для структурного моделирования трубы соединяются с помощью трехмерных концевых элементов. Процедура временной интеграции, используемая для структурной динамики, основана на стандартном методе второго порядка Боссака. За каждый период времени решается задача о жидкости, проводится аэроупругий анализ и обновляется геометрия сетки жидкости каждой плоскости в соответствии с движениями конструкций.

- В работе [24] использовано параметрическое исследование для оценки значения врачательных составляющих движения Земли в сейсмическом проектировании. Первая часть работы посвящена выводу формулы, которая может быть использована для выражения важности врачательных компонентов по сравнению с классическим сейсмическим проектированием без их использования. Используется квазистатический анализ, предполагающий инерционные силы. Важную роль играет форма фундаментального режима колебаний. По причинам простоты используется известное выражение для оценки первого собственного режима как экспоненциальной функции с различными коэффициентами мощности, которые различаются для разных типов зданий. Возможность изменения параметров грунта впоследствии включается в формулу для оценки фундаментальной частоты высотных зданий. В следующей части выполнены общие сейсмические анализы сложных моделей МКЭ трехмерных зданий и труб. Результаты этих анализов затем сравниваются с результатами упрощенных расчетов. Далее обсуждается важность характеристик грунта для определения необходимости учета врачательных эффектов.

- В работе [25] исследуется влияние параметров управления реактивным гасителем колебаний на амплитуду сейсмических перемещений конструкции башенного типа. Анализируется чувствительность отклика нестационарно движущейся башни на ограничения по перемещению; на скорость выбрасываемой реактивной струи; на время разового реактивного воздействия. Приведен алгоритм определения оптимальных параметров управления реактивными воздействиями. Даны оценки эффективности использования реактивного гасителя колебаний.

- Работа [26] посвящена возможности экспериментальной оценки эффективности работы механического гасителя колебаний в процессе эксплуатации инженерного сооружения. Современные механические гасители колебаний, как правило, не позволяют оценить эффективность их работы в ходе эксплуатации. Существует риск недостаточной объективности технического заключения, выдаваемого изготовителем гасителя. На конкретном примере представлен общий обзор возможности оценки эффективности механического гасителя колебаний высотного сооружения в рамках независимой научно-технической экспертизы.

- В работе [27] рассмотрена проблема смещения направления обрушения, вызванного воздействием высотного железобетонного дымохода в процессе взрывного сноса, в сочетании с такими методами мониторинга, как наблюдение высокоскоростной фотосъемки, пьезоэлектрического керамического датчика и вибромонитора взрыва, на примере высотного дымохода высотой 180 м. Результаты показывают, что труба будет испытывать множественные эффекты потери веса и перевеса во время процесса оседания, вызывая волны сжимающего напряжения в трубе. При большом смещении оседания сломанный железобетон внизу может иметь значительный буферный эффект, а эффект перевеса постепенно ослабевает, пока оседание не прекратится. Форма волны точки мониторинга пьезоэлектрического керамического датчика разделена на три этапа, которые конкретно характеризуют процесс развития взрывной нагрузки и воздействия трубы. Колебания, индуцированные взрывом, в основном представляют собой высокочастотные колебания выше 50 Гц; колебания, индуцированные обрушением дымовых труб, в основном

представляют собой низкочастотные колебания ниже 10 Гц. В процессе взрывного разрушения и обрушения высотного железобетонного дымохода из-за удара оседания стенка опорной трубы подвергается неравномерной силе, что приводит к отклонению направления обрушения.

- В работе [28] исследованы эквивалентные статические ветровые нагрузки (ЭСВН), принимаемые во внимание при конструктивном проектировании для учета пиковых динамических ветровых эффектов. В практике ЭСВН предназначены для конструкций без управления. Для гибких конструкций с устройствами виброрегуляции требуется исследование ЭСВН. Инертные вибропоглотители (ИВП), благодаря своему легкому весу и высокой производительности, в последнее время привлекают большое внимание исследователей. В работе установлена общая аналитическая структура ЭСВН для конструкций с ИВП. Приведены аналитические оптимальные конструктивные формулы для ИВП с различными конфигурациями и местами установки. Оценка ЭСВН для высотного дымохода, управляемого ИВП, иллюстрирована, и результаты показали значительный эффект снижения ЭСВН ИВП, особенно для поперечного вихревого резонанса. Представленный подход может быть применен к более сложным конструкциям и устройствам управления вибрацией.

- В работе [29] дан анализ нелинейных колебаний сложной динамической системы, представляющей собой шарнир, стержень и шар, скрепленные единым образом. Получено дифференциальное уравнение движения маятника с учетом трения в шарнире и при учете сопротивления континуума. Решение задачи основано на законе сохранения энергии с учетом диссипации энергии как в шарнире, так и при движении скрепленных стержня и шара в вязкой среде. Аналитически показано, что на динамику рассматриваемой системы существенно влияют потери энергии в шарнире, приводящие к сильному уменьшению времени затухания при колебательном движении, которое носит нелинейный характер. Численное решение нелинейного уравнения указывает на сильно неоднородные осцилляции обобщенной координаты, в качестве которой был выбран угол отклонения маятника от вертикальной оси. В работе предложен метод вывода дифференциальных уравнений движения сложных динамических систем.

- В работе [30] рассматривается задача о снижении уровня вибраций на лапах электрических машин с помощью динамических гасителей колебаний. Для этого лапа электрических машин представляется в виде подамортизированного твердого тела с шестью степенями свободы, установленного на вязкоупругих опорах. Разработан алгоритм и комплекс программ для исследования динамических характеристик механических систем с конечным числом степеней свободы. Реальная электрическая машина заменена моделью твердого тела на амортизаторах, имеющего шесть степеней свободы. С помощью принципа Даламбера выведены уравнения малых колебаний твердого тела с гасителями. Получена упрощенная система уравнений, учитывающая только три степени свободы. Установлено, что оптимальная настройка гасителей находится в пределах частоты 50.6...50.7 Гц и двухмассовый гаситель на 10...15% эффективнее одномассового гасителя.

- В работе [31] предложен эффективный численный метод решения обратной нелинейной задачи о движении диска ротора компрессора в упорном подшипнике скольжения. Построена математическая модель гидродинамических и тепловых процессов в подшипнике при условии осевого движения диска ротора. В рамках модели сформулирована обратная нелинейная задача определения положения ротора при заданном изменении внешней нагрузки. Предложен итерационный метод решения, использующий решение прямой задачи. Проведены численные эксперименты, показавшие эффективность предложенных подходов. Построен комплекс программ, позволяющий рассчитывать нелинейную систему движения ротора при различных физических и геометрических параметрах.

Как показывает приведенный анализ опубликованных научных работ, каждая из этих работ имеет как свои преимущества, так и некоторые недостатки, несмотря на это, все они используются при решении конкретных практических задач.

Исходя из этого анализа, можно отметить, что разработка математических моделей, методов решения и исследование динамики высотного сооружения с использованием динамического гасителя колебаний на данный момент является весьма актуальной и современной проблемой, требующей своего решения.

1. Методика

1.1. Математическая модель. В данной работе рассматриваются вынужденные колебания системы «сооружение с ДГК». Сооружение рассматривается как консольная балка переменного сечения с переменным уклоном (рис. 1) образующих с установленными в нескольких точках гасителями. Материал сооружения рассматривается нелинейно-упругим, вязкоупругим и упруго-пластическим.

Упругопластические свойства материала описываются билинейной диаграммой, в которой петля гистерезиса, характеризующая зависимость реакции сооружения от деформации [32], представляется в виде параллелограмма (рис. 2).

Такая зависимость зачастую является билинейной и характеризуется тремя параметрами (см. рис. 2): F , θ_1 , θ_2 .

Когда материал сооружения и пружины ДГК предполагаются линейно-вязкоупругими, то их свойства описываются наследственной теорией Больцмана–Вольтерры [33], то есть

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}_z &= E \left\{ \varepsilon_z - \int_0^t R_1(t-\tau) \varepsilon_z(\tau) d\tau \right\}, \\ \tilde{K}_{ki} &= K_{ki} \left[w(t) - \int_0^t R_2(t-\tau) W(\tau) d\tau \right].\end{aligned}\quad (1)$$

Предполагая интегральные члены малыми [34], длительный модуль упругости материала и жесткость пружины приводятся к комплексным соотношениям вида

$$\begin{aligned}\tilde{E} &\approx E [1 - i\Gamma_1^s(p) - \Gamma_1^c(p)], \\ \tilde{K}_{ki} &\approx K_{ki} [1 - i\Gamma_2^s(p) - \Gamma_2^c(p)].\end{aligned}\quad (2)$$

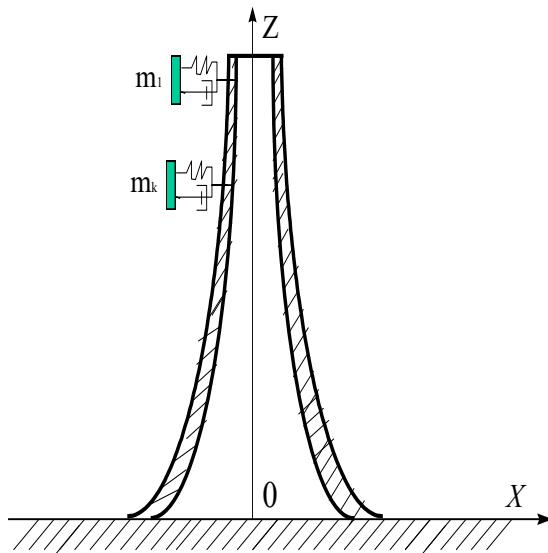


Рис. 1. Расчетная схема сооружения с ДГК

Fig. 1. Calculation scheme of a structure with DVD

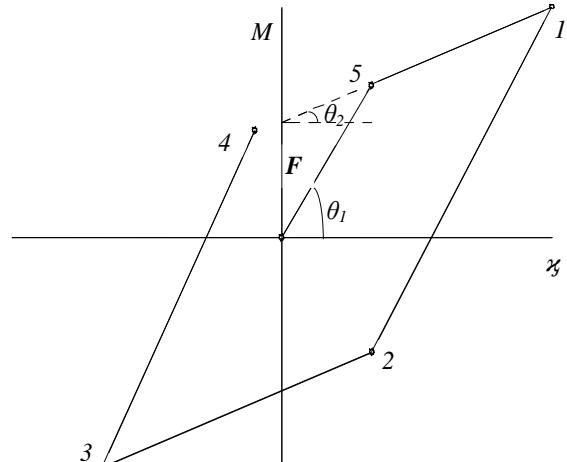


Рис. 2. Билинейная диаграмма деформирования

Fig. 2. Bi-linear deformation diagram

Здесь $\Gamma_1^c(p) = \int_0^\infty R_1(p) \cos p\tau dt$; $\Gamma_1^s(p) = \int_0^\infty R_1(p) \sin p\tau dt$; $\Gamma_2^c(p) = \int_0^\infty R_2(p) \cos p\tau dt$; $\Gamma_2^s(p) = \int_0^\infty R_2(p) \sin p\tau dt$ — косинус- и синус-образы Фурье ядра; E — мгновенный модуль упругости материала сооружения; K_{ij} — коэффициент мгновенной жесткости соответствующей пружины гасителя; p — частота внешнего воздействия; ($k, i = 1, 2, 3, \dots$).

Требуется определить амплитуды колебаний в различных точках системы «сооружение с ДГК» при различных частотах внешнего воздействия и необходимо установить оптимальные параметры гасителя, при которых достигается наибольший эффект гашения амплитуды колебаний сооружения.

Для математической постановки данной задачи используется вариационное уравнение Лагранжа, основанное на принципе Даламбера [33], то есть

$$\int_0^l \tilde{M}_z \delta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) dz + \rho \int_0^l F(z) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \delta w dz + \sum_{k=1}^N m_k \ddot{w}_k \delta w_k + \sum_{k=1}^N \tilde{K}_{k1} w_k \delta w_k = 0, \quad (3)$$

кинематические условия

$$z = 0 : w = w_0(t); \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

и начальные условия

$$t = 0 : w(z, 0) = 0; \quad \frac{\partial w(z, 0)}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Здесь ρ — плотность материала сооружения; l — длина сооружения; $w(z, t)$ — прогиб сооружения; $\tilde{M}_z = \int_F x \tilde{\sigma}_z dF(z, t)$ — изгибающий момент; $\varepsilon_z = -z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$ — деформация сооружений; $R_1(t)$, $R_2(t)$ — ядра релаксации; $F(z)$ — площадь поперечного сечения; m_k — присоединенные массы гасителя; N — количество присоединенных масс; $\tilde{E}, \tilde{K}_{ki}$ — длительный модуль упругости и жесткость элементов гасителя.

При решении вариационной задачи (3)–(5) при различных кинематических воздействиях с учетом упругопластических, нелинейных вязкоупругих свойств материала сооружения и вязкоупругих параметров ДГК использован метод конечных элементов (МКЭ) [32]. В качестве конечных элементов выбран одномерный конечный элемент с 4-мя степенями свободы.

При учете упругопластического свойства материала предполагалось, что пластические шарниры образуются в концевых сечениях элементов, когда изгибающие моменты в этих сечениях достигают предела текучести. При перемене направления деформирования жесткость восстанавливается до начального значения. Таким образом, для элемента принималась билинейная упругопластическая (см. рис. 2) зависимость «момент–кривизна». Матрица жесткости модели в целом составлялась для каждого интервала времени объединением жесткости элементов, причем для каждого элемента жесткость определялась билинейной зависимостью в соответствии с достигнутым деформированным состоянием.

1.2. Алгоритм упругопластического расчета. После использования процедуры МКЭ [32, 35] рассматриваемая вариационная задача (3)–(5) приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$[M] \{ \dot{w} \} + [C] \{ \dot{w} \} + \{ R(w(t)) \} = -[M] \{ \ddot{w}_0 \}, \quad (6)$$

где $[M]$, $[C]$ — матрицы массы и диссипативных сил сооружения; $\{R(w(t))\}$ — восстанавливающая сила, определяемая петлей гистерезиса, выбирается в зависимости от достигнутого на предыдущем этапе деформированного состояния.

Далее полученная система нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений (6) решается методом Ньюмарка [32].

При решении системы уравнений (6) вектор $\{R(w(t))\}$ определяется на каждом участке петли по универсальной формуле

$$\{R\} = [K]\{w\} + \{P\} \quad (7)$$

с конкретными $[K]$ и $\{P\}$, соответствующими различным этапам колебательного процесса.

Коэффициент жесткости, соответствующий j -й узловой точке петли гистерезиса, и соответствующая i -ая компонента вектора $\{P\}$ сооружения на n -ом этапе колебательного процесса вычисляются по формулам

$$E_j(n) = 0.5 \{ [1 + (-1)^n] K_1 + [1 - (-1)^n] K_2 \},$$

$$P_j(n) = (K_1 - K_2) \left(\sum_{i=-1}^{n-1} (-1)^i w_j^i \right), \quad (8)$$

где n — номер линейного участка на петле гистерезиса. При этом начальный упругий участок соответствует значению $n = 0$.

Коэффициенты определяются следующим образом: $K_1 = tg\theta_1$; $K_2 = tg\theta_2$; w_j^i — значения w_j , соответствующие узловым точкам петли гистерезиса, при этом полагается, что $w_j^{-1} = 0$.

1.3. Тестовый пример. Достоверность методики проверялась на тестовом примере, приведенном в работе [32], где определялась реакция упругопластической рамы как системы с одной степенью свободы при заданной нагрузке.

Расчеты выполнены для системы массой $m = 0.1$, жесткостью в начальный момент $K_1 = 5$ и $K_2 = 0$ в пластической стадии. Коэффициент затухания принят равным $C = 0.2$. Шаг интегрирования $\Delta t = 0.1$ с. Нагрузка $P(t)$ задавалась таблично ([Таблица](#)).

Как видно из представленных результатов ([Таблица](#)), полученные перемещения близки к данным [32], что свидетельствует о достоверности разработанного алгоритма. Некоторое отличие в результатах последних пяти строк возникло в результате недостаточно малого шага интегрирования, что не позволило получить более точные значения для точек перехода на петле гистерезиса, которые формируют решение на последующих шагах интегрирования.

Таблица. Результаты расчетов и их сравнение с тестовыми данными

Table. Results of calculations and their comparison with test data

$t, \text{с}$	$P(t)$	перемещения w		скорость \dot{w}	
		приведены в [32]	получены авторами	приведены в [32]	получены авторами
0	0	0	0	0	0
0.1	5	0.070	0.0704	2.11	2.113
0.2	8	0.493	0.4935	6.35	6.355
0.3	7	1.256	12563	8.03	8.041
0.4	5	2.000	2.002	6.58	6.579
0.5	3	2.519	2.520	3.57	3.565
0.6	2	2.687	2.687	-0.28	-0.265
0.7	1	2.475	2.476	-3.83	-3.828
0.8	0	2.010	1.967	-5.21	-6.016
0.9	0	1.456	1.356	-5.00	-5.715
1.0	0	1.042	0.903	-3.00	-3.05
1.1	0	—	0.774	—	0.453
1.2	0	—	0.968	—	3.173

2. Результаты

С помощью вышеописанного алгоритма исследуются колебания высотного сооружения, оснащенного ДГК (рис. 1). В качестве примера расчета исследовалось динамическое поведение дымовой трубы Ново-Ангренской ТЭС (высота $H = 330$ м, диаметр в нижнем основании $D = 38$ м и на верхней отметке $D = 16.7$ м) при различных кинематических воздействиях и с различными законами деформирования материала.

В расчетах используется кинематическое воздействие в виде

$$z = 0 : w_0 = \cos pt. \quad (9)$$

При исследовании резонансного колебательного режима необходимо задание кинематического воздействия с частотой p , близкой к основной частоте ω колебаний системы. Здесь выбрано $p \approx \omega$, где ω — основная собственная частота колебаний системы, совпадающая с частотой воздействия p .

2.1. Колебания высотного сооружения с ДГК при учете вязкоупругих свойства материала и гасителя. В данном случае материал сооружения предполагается линейно-вязкоупругим. Для описания вязкоупругого свойства материала сооружения использовалось ядро А. Р. Ржаницына $R(t) = \lambda \exp(-\beta t)t^{(\alpha-1)}$, где $A = 0.0234$, $\alpha = 0.075$, $\beta = 0.00000014$, определенные из экспериментальных кривых ползучести железобетона [33].

При частоте воздействия, близкой к частоте собственных колебаний системы «сооружение с ДГК», вязкоупругие параметры пружины гасителя были приняты равными $\Gamma_2^{\ddot{\eta}} = 0.2$, $\Gamma_2^s = 0.02$.

При использовании (2) задача упрощается, и система дифференциальных уравнений (6) приводится к линейной системе дифференциальных уравнений с комплексными коэффициентами, которая далее решается методом Ньюмарка.

На рис. 3 приведены изменения горизонтальных перемещений w для точки сооружения ($z = 325$ м) (см. рис. 1) по времени с учетом вязкоупругих свойств материала и вязких свойств пружины гасителя при резонансном режиме колебаний — при воздействии в основании сооружения воздействия по закону (9).

На рис. 3 показаны полученные результаты без учета гасителя (сплошная линия) и с учетом вязкоупругого ДГК (линия со звездочкой).

Сопоставление этих результатов показывает, что ДГК, настроенный на основную частоту системы «сооружение с ДГК», практически полностью устранил большие амплитуды колебаний в резонансном режиме. При этом гаситель колеблется с большой амплитудой, а сооружение совершает колебания с намного меньшей амплитудой по сравнению без гасителя.

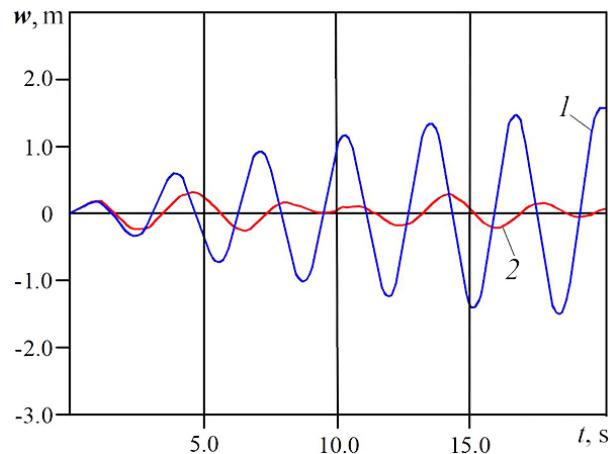


Рис. 3. Изменения горизонтальных перемещений w точки ($z = 325$ м) сооружения с учетом линейно-вязкоупругих свойств материала сооружения без гасителя (1) и с ДГК (2) при кинематическом воздействии (9)

Fig. 3. Changes in horizontal displacements w of a point ($z = 325$ m) on the structure, considering the linear viscoelastic properties of the structure's material, without a damper (1) and with a DVD (2) under kinematic excitation (9)

2.2. Колебания высотного сооружения с ДГК с учетом физически нелинейного деформирования материала сооружения. Рассматриваются колебания системы «сооружение с ДГК» (см. рис. 1) с учетом нелинейно-вязкоупругих свойств материала сооружения в резонансном режиме колебаний при действии в основании сооружения кинематического воздействия (9).

В данном случае материал сооружения рассматривается как упругий, так и нелинейно-вязкоупругий, а для описания связи между напряжением и деформацией используется кубическая нелинейность [33], то есть

$$\tilde{\sigma}_z = E \left\{ \left[\varepsilon_z(t) - \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon_z(\tau)d(\tau) \right] - \gamma \left[\varepsilon_z^3(t) - \int_0^t R_3(t-\tau)\varepsilon_z^3(\tau)d(\tau) \right] \right\}, \quad (10)$$

где E — мгновенный модуль упругости материала; R, R_3 — ядра релаксации; $\gamma = \text{const} > 0$ — коэффициент нелинейности.

В конкретных расчетах коэффициент нелинейности γ принят равным $\gamma = 120000$, что позволило описать экспериментальные кривые $\sigma = f(\varepsilon)$ с необходимой точностью при малых деформациях.

При этом частота воздействия p принята почти равной собственной частоте ω системы. Вязкоупругие параметры пружины гасителя приняты, как и для предыдущего случая.

Во всех рассмотренных примерах максимальная амплитуда воздействия принята одинаковой и равной единице.

На рис. 4 приведены полученные результаты для горизонтальных перемещений w для точки ($= 325$ м) сооружения по времени для случаев: материал сооружения линейно-упругий без ДГК; материал сооружения нелинейно-вязкоупругий без ДГК; материал сооружения нелинейно-вязкоупругий с ДГК.

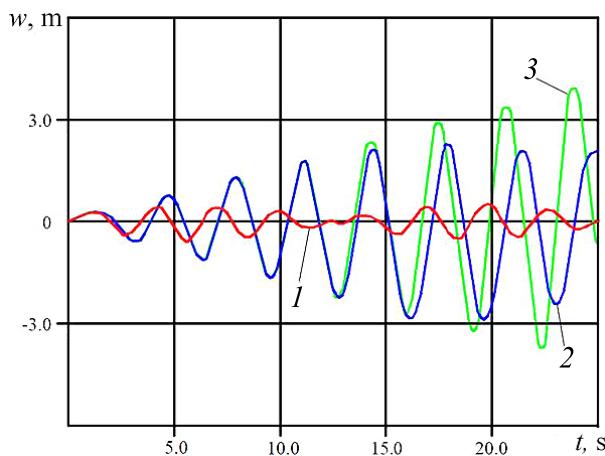


Рис. 4. Изменения горизонтальных перемещений w точки ($z = 325$ м) сооружения: материал сооружения нелинейно-упругий без учета ДГК (3); материал сооружения нелинейно-вязкоупругий без учета ДГК (2); материал сооружения нелинейно-вязкоупругий с учетом ДГК (1) при кинематическом воздействии (9)

Fig. 4. Changes in horizontal displacements w of a point ($z = 325$ m) of a structure: the structure material is nonlinearly elastic without taking into account the DVD (3); the structure material is nonlinearly viscoelastic without taking into account the DVD (2); the structure material is nonlinearly viscoelastic taking into account the DVD (1) under kinematic action (9)

На рис. 4 приведены полученные результаты для трех случаев: материал сооружения нелинейно-упругий (кривая 3) без учета ДГК; материал сооружения нелинейно-вязкоупругий (кривая 2) без учета ДГК; материал сооружения нелинейно-вязкоупругий и гаситель линейно-вязкоупругий (кривая 1). Как видно из полученных результатов (см. рис. 4), в процессе колебаний в начале процесса, когда перемещения еще малы, различие амплитуд для трех случаев практически отсутствует. С увеличением времени колебаний при учете нелинейно упругих свойств материала сооружения амплитуда колебаний (кривая 3) растет, происходит резонанс, как в упругом случае. Учет нелинейно-вязкоупругих свойств сооружения также не позволяет росту амплитуды колебаний (кривая 2) по времени. Установка гасителя и учет нелинейных вязкоупругих свойств сооружения эффективно снижает уровень колебаний сооружения (кривая 1). При этом учет вязкоупругих свойств незначительно уменьшает частотный спектр колебаний.

2.3. Колебания высотного сооружения с ДГК с учетом упругопластического деформирования материала сооружения.

На рис. 5 показаны изменения амплитуды колебаний верхней точки ($z = 325$ м) сооружения (то есть горизонтальные перемещения — w) при низкочастотном воздействии вида

$$\ddot{w}_0 = \begin{cases} \sin(0.3pt), & 0 \leq t \leq \frac{2\pi}{0.3p}, \\ 0, & t > \frac{2\pi}{0.3p} \end{cases} \quad (11)$$

с учетом упругопластических свойств материала сооружения без учета ДГК (кривая 1) и с учетом линейно-вязкоупругих свойств ДГК (кривая 2).

Анализ графиков (рис. 5) показывает, что учет упругопластических свойств материала сооружения и с ДГК (кривая 2) увеличивает период колебаний сооружения и приводит к снижению уровня колебаний высотного сооружения примерно почти в два раза.

Таким образом, полученные расчеты высотного сооружения с ДГК при различных динамических воздействиях и с учетом различных свойств материала сооружения и ДГК позволяют сделать выводы, касающиеся эффективности использования ДГК при эксплуатации высотных сооружений в различных динамических режимах.

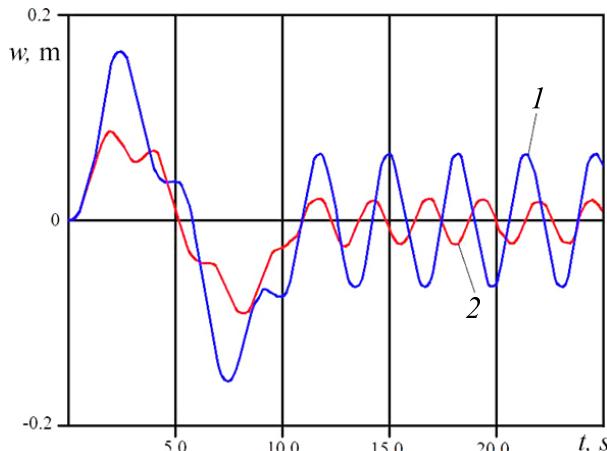


Рис. 5. Изменения горизонтальных перемещений верха точки ($z = 325$ м) сооружения с учетом упругопластических свойств материала сооружения: без ДГК (— —) и с ДГК (— * — * —) при низкочастотном кинематическом воздействии (11)

Fig. 5. Changes in horizontal displacements of the top point ($z = 325$ m) of the structure taking into account the elastic-plastic properties of the structure material: without DVD (— —) and with DVD (— * — * —) under low-frequency kinematic action (11)

Заключение

1. В работе приведен подробный обзор известных работ, связанных с исследованием динамического поведения ряда высотных сооружений с ДГК и без него.
2. Для оценки динамического поведения сооружения с использованием ДГК дана математическая модель, метод и алгоритм решения поставленных задач с учетом линейно- и нелинейно-упругих, вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения с ДГК при действии различных кинематических воздействий.
3. Исследованы колебания высотных сооружений с учетом линейно-, нелинейно-упругих, вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения с ДГК при различных кинематических воздействиях вблизи резонансного режима.
4. Выявлена эффективность гашения колебаний высотного сооружения при учете нелинейно-вязкоупругих и упругопластических свойств материала сооружения совместно с вязкоупругим ДГК.

Список литературы

1. Klein H. W., Kaldenbach W. A new vibration damping facility for steel chimneys // In: Proc. of the Conference on Mechanics in Design. Trent University of Nottingham, UK. 1998.
2. Sun Y., Li Zh., Sun X., Su N., Peng Sh. Interference effects between two tall chimneys on wind loads and dynamic responses // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020. Vol. 206. P. 104227. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104227.

3. *Vilceanu V., Kavrakov I., Morgenthal G.* Coupled numerical simulation of liquid sloshing dampers and wind–structure simulation model // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2023. Vol. 240. P. 105505. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105505.
4. *Krishnan R., Deshmukh M. A., Sivakumar V. L., Joshi G., Geethakumari T., Prakash F.* Effective tuned mass damper system for RC tall chimney dynamic wind response control // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.660.
5. *Flaga A., Klaput R., Flaga L., Krajewski P.* Wind tunnel model tests of wind action on the chimney with grid-type curtain structure // Archives of Civil Engineering. 2021. Vol. 67, no. 3. P. 177–196. DOI: 10.24425/ace.2021.138050.
6. *Rousseau J. P.* Dynamic Evaluation of the Solar Chimney. MScEng Thesis. Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2005. 90 p.
7. *Niemann H.-J., Lupi F., Hoeffer R.* Vibrations of chimneys under the action of the wind // In: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014. 30 June – 2 July 2014, Porto, Portugal. P. 1385–1391.
8. *Xu Zh.-D., Zhu J.-T., Wang D.-X.* Analysis and optimization of wind-induced vibration control for high-rise chimney structures // International Journal of Acoustics and Vibration. 2014. Vol. 19, no. 1. P. 42–51. DOI: 10.20855/ijav.2014.19.1336.
9. *Bajpai V.K., Garg T.K., Gupta M.K.* Vibration-dampers for smoke stacks // In: International Conference on Applied and Theoretical Mechanics. 14–16 December, 2007, Tenerife, Spain. WSEAS Press, 2007. P. 124–130.
10. *Babu B., Ravindraraj B. J., Kumar R. R., Saranya R.* Dynamic behaviors of tall chimneys // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2016. Vol. 5, no. 3. P. 287–294.
11. *Elias S., Rupakhetty R., Olafsson S.* Tuned mass dampers for response reduction of a reinforced concrete chimney under near-fault pulse-like ground motions // Front. Built Environ. 2020. Vol. 6. P. 92. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00092.
12. *Ingale S. D., Magdum M. M.* Vibration control of uniformly tapered chimney by using tuned mass damper // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. 2013. Vol. 2, no. 1 P. 148–163.
13. *Kuras P., Ortyl-L., Owerko T., Kocierz R., Kedzierski M., Podstolak P.* Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods // In: Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016). Book 2, Vol. 3. Albena, Bulgaria. 2016. P. 255–262.
14. *Karakozova A. I., Mondrus V. L.* Resonant vortex excitation of high-rise structures // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19, no. 2. P. 60–70. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-60-70.
15. *Aoki T., Sabia D., Rivella D., Muto H.* Dynamic identification and model updating of the Howa brick chimney, Tokoname, Japan // WIT Transactions on the Built Environment. 2005. Vol. 83. P. 265–275. DOI: 10.2495/STR050261.
16. *Mirsaidov M., Abdikarimov R., Khudainazarov S., Sabirjanov T.* Damping of high-rise structure vibrations with viscoelastic dynamic dampers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 224. P. 02020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022402020.
17. *Mirsaidov M. M., Khudainazarov Sh. O.* Spatial natural vibrations of viscoelastic axisymmetric structures // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 4(96). P. 118–128, DOI: 10.18720/MCE.96.10.
18. *Мирсаидов М. М., Сафаров И. И., Тешаев М. Х., Элибоев Н. Р.* Свободные линейные колебания вязкоупругой сферической оболочки с заполнителем // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 4. С. 485–496. DOI: 10.18500/0869-6632-003162.
19. *Mirsaidov M. M., Nosirov A. A., Nasirov I. A.* Modeling of spatial natural oscillations of axisymmetric systems // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1921. P. 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/1921/1/012098.
20. *Utomo J., Moestopo M., Surahman A., Kusumastuti D.* Applications of vertical steel pipe dampers

- for seismic response reduction of steel moment frames // MATEC Web Conf. 2017. Vol. 138. P. 02002. DOI: 10.1051/matecconf/201713802002.
21. *Guo W., Chen X., Yu Y., Bu D., Li S., Fang W., Wang X., Zeng Ch., Wang Y.* Development and seismic performance of bolted steel dampers with X-shaped pipe halves // Eng. Struct. 2021. Vol. 239. P. 112327. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112327.
 22. *Maleki S., Mahjoubi S.* Dual-pipe damper // J. Constr. Steel Res. 2013. Vol. 85. P. 81–91. DOI: 10.1016/J.JCSR.2013.03.004.
 23. *Belver A. V., Magdaleno Á., Brownjohn J. M. W., Lorenzana A.* Performance of a TMD to mitigate wind-induced interference effects between two industrial chimneys // Actuators. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 12. DOI: 10.3390/act10010012.
 24. *Sokol M., Ároch R., Lamperová K., Marton M., García-Sanz-Calcedo J.* Parametric analysis of rotational effects in seismic design of tall structures // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, no. 2. P. 597. DOI: 10.3390/app11020597.
 25. *Шеин А. И., Зайцев М. Б.* Гашение сейсмических колебаний сооружений башенного типа с помощью реактивного гасителя // Эксперт: теория и практика. 2023. Т. 4, № 23. Р. 171–176. DOI: 10.51608/26867818.
 26. *Патрикеев А. В.* Оценка эффективности механического гасителя колебаний высотного сооружения в процессе эксплуатации // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 9(99). С. 23–26. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.004.
 27. *Huang X., Xie X., Sun J., Zhong D., Yao Y., Tu S.* Monitoring and analysis of the collapse process in blasting demolition of tall reinforced concrete chimneys // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 13. P. 6240. DOI: 10.3390/s23136240.
 28. *Su N., Peng S., Chen Z., Hong N., Uematsu Y.* Equivalent static wind load for structures with inertial-based vibration absorbers // Wind. 2022. Vol. 2, no. 4. P. 766–783. DOI: 10.3390/wind2040040.
 29. *Гладков С. О., Богданова С. Б.* К вопросу учета силы сопротивления в шарнирной точке крепления физического маятника и ее влияние на динамику движения // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 1. С. 53–62. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-1-53-62.
 30. *Сафаров И. И., Тешаев М. Х.* Динамическое гашение колебаний твёрдого тела, установленного на вязкоупругих опорах // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 1. С. 63–74. DOI: 10.18500/0869-6632-003021.
 31. *Федотов П. Е., Соколов Н. В.* Решение нелинейной задачи одностороннего динамически нагруженного упорного подшипника скольжения // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 2. С. 180–196. DOI: 10.18500/0869-6632-003097.
 32. *Клаф Р., Пензиен Дж.* Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
 33. *Mirsaidov M. M., Sultanov T. Z.* Use of linear heredity theory of viscoelasticity for dynamic analysis of earthen structures // Soil Mech. Found. Eng. 2013. Vol. 49, no. 6. P. 250–256. DOI: 10.1007/s11204-013-9198-8.
 34. *Филатов А. Н.* Асимптотические методы в теории дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений. Ташкент: Фан, 1974. 214 с.
 35. *Бате К., Вилсон Е.* Численные методы анализа и МКЭ. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.

References

1. Klein HW, Kaldenbach W. A new vibration damping facility for steel chimneys. In: Proc. of the Conference on Mechanics in Design. Trent University of Nottingham, UK. 1998.
2. Sun Y, Li Zh, Sun X, Su N, Peng Sh. Interference effects between two tall chimneys on wind loads and dynamic responses. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020;206:104227. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104227.
3. Vilceanu V, Kavrakov I, Morgenthal G. Coupled numerical simulation of liquid sloshing dampers and wind-structure simulation model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2023;240:105505. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105505.

4. Krishnan R, Deshmukh MA, Sivakumar VL, Joshi G, Geethakumari T, Prakash F. Effective tuned mass damper system for RC tall chimney dynamic wind response control. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.660.
5. Flaga A, Klaput R, Flaga-L, Krajewski P. Wind tunnel model tests of wind action on the chimney with grid-type curtain structure. *Archives of Civil Engineering*. 2021;67(3):177–196. DOI: 10.24425/ace.2021.138050.
6. Rousseau JP. Dynamic Evaluation of the Solar Chimney. MScEng Thesis. Stellenbosch: University of Stellenbosch; 2005. 90 p.
7. Niemann H-J, Lupi F, Hoeffer R. Vibrations of chimneys under the action of the wind. In: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014. 30 June – 2 July 2014, Porto, Portugal. P. 1385–1391.
8. Xu Zh-D, Zhu J-T, Wang D-X. Analysis and optimization of wind-induced vibration control for high-rise chimney structures. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 2014;19(1):42–51. DOI: 10.20855/ijav.2014.19.1336.
9. Bajpai VK, Garg TK, Gupta MK. Vibration-dampers for smoke stacks. In: International Conference on Applied and Theoretical Mechanics. 14–16 December, 2007, Tenerife, Spain. WSEAS Press; 2007. P. 124–130.
10. Babu B, Ravindraraj BJ, Kumar RR, Saranya R. Dynamic behaviors of tall chimneys. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2016;5(3):287–294.
11. Elias S, Rupakhety R, Olafsson S. Tuned mass dampers for response reduction of a reinforced concrete chimney under near-fault pulse-like ground motions. *Front. Built Environ.* 2020;6:92. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00092.
12. Ingale SD, Magdum MM. Vibration control of uniformly tapered chimney by using tuned mass damper. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 2013;2(1):148–163.
13. Kuras P, Ortyl-L, Owerko T, Kocierz R, Kędzierski M, Podstolak P. Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods. In: Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016). Book 2, Vol. 3. Albena, Bulgaria. 2016. P. 255–262.
14. Karakozova AI, Mondrus VL. Resonant vortex excitation of high-rise structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023;19(2):60–70. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-60-70.
15. Aoki T, Sabia D, Rivella D, Muto H. Dynamic identification and model updating of the Howa brick chimney, Tokoname, Japan. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2005;83:265–275. DOI: 10.2495/STR050261.
16. Mirsaidov M, Abdikarimov R, Khudainazarov S, Sabirjanov T. Damping of high-rise structure vibrations with viscoelastic dynamic dampers. *E3S Web Conf.* 2020;22:02020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022402020.
17. Mirsaidov MM, Khudainazarov ShO. Spatial natural vibrations of viscoelastic axisymmetric structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;4(96):118–128. DOI: 10.18720/MCE.96.10.
18. Mirsaidov MM, Safarov II, Teshaev MK, Eliboyev NR. Free linear vibrations of a viscoelastic spherical shell with filler. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025;33(4):485–496. DOI: 10.18500/0869-6632-003162.
19. Mirsaidov MM, Nosirov AA, Nasirov IA. Modeling of spatial natural oscillations of axisymmetric systems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1921:012098. DOI: 10.1088/1742-6596/1921/1/012098.
20. Utomo J, Moestopo M, Surahman A, Kusumastuti D. Applications of vertical steel pipe dampers for seismic response reduction of steel moment frames. *MATEC Web Conf.* 2017;138:02002. DOI: 10.1051/matecconf/201713802002.
21. Guo W, Chen X, Yu Y, Bu D, Li S, Fang W, Wang X, Zeng Ch, Wang Y. Development and seismic

- performance of bolted steel dampers with X-shaped pipe halves. Eng. Struct. 2021;239:112327. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112327.
22. Maleki S, Mahjoubi S. Dual-pipe damper. J. Constr. Steel Res. 2013;85:81–91. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.004.
 23. Belver AV, Magdaleno Á, Brownjohn JMW, Lorenzana A. Performance of a TMD to mitigate wind-induced interference effects between two industrial chimneys. Actuators. 2021;10(1):12. DOI: 10.3390/act10010012.
 24. Sokol M, Ároch R, Lamperová K, Marton M, García-Sanz-Calcedo J. Parametric analysis of rotational effects in seismic design of tall structures. Appl. Sci. 2021;11(2):597. DOI: 10.3390/app11020597.
 25. Shein AI, Zaitsev MB. Extinction of seismic oscillations of tower-type structures using a jet damper. Expert: Theory and Practice. 2023;4(23):171–176 (in Russian).
 26. Patrikeev AB. Evaluating performance of the mechanical dampener of a high-rise structure in use. International Research Journal. 2020;(9(99)):23–26 (in Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.004.
 27. Huang X, Xie X, Sun J, Zhong D, Yao Y, Tu S. Monitoring and analysis of the collapse process in blasting demolition of tall reinforced concrete chimneys. Sensors. 2023;23(13):6240. DOI: 10.3390/s23136240.
 28. Su N, Peng S, Chen Z, Hong N, Uematsu Y. Equivalent static wind load for structures with inerter-based vibration absorbers. Wind. 2022;2(4):766–783. DOI: 10.3390/wind2040040.
 29. Gladkov SO, Bogdanova SB. On the question accounting of the resistance force at the hinge point of setting physical pendulum and its influence on the dynamics of movement. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2019;27(1):53–62. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-1-53-62.
 30. Safarov II, Teshaev MK. Dynamic damping of vibrations of a solid body mounted on viscoelastic supports. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(1):63–74. DOI: 10.18500/0869-6632-003021.
 31. Fedotov PE, Sokolov NV. Solving a nonlinear problem for a one-sided dynamically loaded sliding thrust bearing. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(2):180–196. DOI: 10.18500/0869-6632-003097.
 32. Clough RW, Penzien J. Dynamics of Structures. N.Y.: McGraw-Hill; 1975. 634 p.
 33. Mirsaidov MM, Sultanov TZ. Use of linear heredity theory of viscoelasticity for dynamic analysis of earthen structures. Soil Mech. Found. Eng. 2013;49(6):250–256. DOI: 10.1007/s11204-013-9198-8.
 34. Filatov AN. Asymptotic Methods in the Theory of Differential and Integral-Differential Equations. Tashkent: Fan; 1974. 214 p. (in Russian).
 35. Bathe KJ, Wilson EL. Numerical Methods in Finite Element Analysis. Hoboken: Prentice-Hall; 1976. 528 p.

Мирсаидов Мирзиёд Мирсаидович — родился в Юкоричирчикском районе Ташкентской области Узбекской ССР (1948). Окончил Ташкентский политехнический институт по специальности «Инженер-механик» (1971) и Ташкентский государственный университет по специальности «Математик» (1986). Доктор технических наук (1987), профессор (1991), академик Академии наук Республики Узбекистан (2017). Заведующий кафедрой механики и компьютерного моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». Научный руководитель 30 кандидатских (PhD) и 6 докторских (DSc) диссертаций. Автор более 200 научных работ в отечественных и зарубежных научных журналах, более 250 — в сборниках материалов зарубежных и республиканских научных конференций, более 15 монографий, 9 учебников и 14 учебных пособий.



Узбекистан, Ташкент 100000, ул. Кари Ниязи, 39
Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
E-mail: mirsaidov1948@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8907-7869
AuthorID (eLibrary.Ru): 980333



Иимматов Алишер Наркабилович — родился в 1962 году. Кандидат физико-математических наук, доцент. Доцент кафедры механики и компьютерного моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». Автор более 60 научных работ, более 10 авторских свидетельств.

Узбекистан, Ташкент 100000, ул. Кари Ниязи, 39

Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

E-mail: ribs@mail.ru

ScopusID: 7801321486



Юлдошев Бахтиёр Шодмонович — родился в 1968 году. Кандидат физико-математических наук, доцент. Доцент кафедры механики и компьютерное моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». Автор более 50 научных работ и более 10 авторских свидетельств.

Узбекистан, Ташкент 100000, ул. Кари Ниязи, 39

Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

E-mail: Baxtiyor_yuldashev68@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9006-5662

ScopusID: 57202157721



Салимов Шоолим Музффорович — родился в 1990 году. Заведующий кафедрой математики Ташкентского университета прикладных наук. Автор более 10 научных работ.

Узбекистан, 100149 Ташкент, ул. Гавхар, 1

Ташкентский университет прикладных наук

E-mail: salimovshoolim@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0750-8619

ScopusID: 57219129262



Хазраткулов Исломжон Обид угли — родился в 1993 году. Докторант кафедры механики и компьютерного моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». Автор более 20 научных работ.

Узбекистан, Ташкент 100000, ул. Кари Ниязи, 39

Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

E-mail: islomjon.xazratqulov093@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6380-6528

ScopusID: 57214069488