

УДК 621 + 699.8

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-27-36

## Структурная схема средств виброзащиты строительных конструкций с подвижными нагрузками\*

И. А. Пушкарев, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрены способы моделирования процесса выбора методов и средств виброзащиты строительных конструкций с подвижными нагрузками на основе обзора литературы по данной теме. Проведен структурный анализ устройств виброзащиты строительных конструкций. Предложены различные варианты снижения негативного влияния внешних воздействий в каждом конкретном случае.*

*В настоящее время строительные конструкции и здания в целом находятся под воздействием значительного числа источников нежелательных вибраций как природного, так и техногенного характера. Так, например, в жилых и общественных зданиях возросло число насосов, вентиляторов, кондиционеров, используется большое количество различных машин, механизмов и оборудования. В процессе строительства, а также ремонта и реконструкции здание подвергается ударному, массовому (статическому), вибрационному воздействию. Увеличение количества транспорта и транспортных сетей (которые сами по себе являются системами с подвижными нагрузками), проходящих в непосредственной близости от зданий и сооружений, также оказывают на них влияние, как акустическое, так и механическое. Высотные здания подвергаются силовому воздействию ветра; здания, расположенные в сейсмоопасных районах, – сейсмическому воздействию. Следует отметить, что многочисленные источники вибрации в подавляющем большинстве могут быть сведены к подвижным нагрузкам. Поэтому в настоящее время задача снижения воздействия подвижных нагрузок на строительные конструкции и возникающих при этом неблагоприятных факторов (шума, колебаний, вибрации и др.) для комфортного проживания и жизнедеятельности человека является актуальной.*

*Для защиты зданий и сооружений от различных видов подвижных нагрузок и неблагоприятных факторов предусматриваются системы защиты. Систему защиты строительных конструкций от негативных воздействий различного характера можно условно поделить на встроенную и специальную. Например, неподвижные конструкции здания можно сконструировать таким образом, чтобы они представляли собой встроенные массовые демпферы, защищающие высотные здания от силового воздействия ветра; инженерные системы предусматривают установку шумоглушителей на воздуховодах, шумопоглощающих панелей, применение виброизоляции, виброоснований, плавающих полов при установке различного оборудования. Под специальной системой защиты подразумеваются специальные устройства и оборудование: молниеотводы, сточные трубы, системы электрообогрева и др. Специальные мероприятия могут заключаться в установке защитных устройств на трубопроводах, таких как резонансные стабилизаторы волновых процессов, магнитореологические устройства и др.*

*Для выбора наиболее подходящего средства виброзащиты строительных конструкций с подвижными нагрузками предлагается использовать методы функционально-структурного анализа.*

**Ключевые слова:** виброзащита, строительные конструкции, структурный анализ, подвижные нагрузки, вибрации, методы защиты.

### Введение

Для защиты зданий и сооружений от различных видов подвижных нагрузок и неблагоприятных факторов предусматриваются различные системы защиты; обеспечиваются условия работы, при которых вибрация, воздействующая на человека, не превышает некоторых установленных пределов (ГОСТ 12.1.012–2004. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования); устанавливаются предельно допустимые уровни скорректированного значения виброскорости (ГОСТ 17770–86.

Машины ручные. Требования к вибрационным характеристикам). Методы и средства виброзащиты анализируются и классифицируются на основе различных структурных моделей (ГОСТ 26568–85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация). В нормативных документах указаны также зависимости для определения требуемых параметров (динамического модуля упругости, коэффициента потерь и др.), а также порядок проведения акустических расчетов и применения различных методов и средств защиты для снижения расчетных или фактических

уровней шума до требований санитарных норм (ГОСТ 26568–85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация; СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03–2003. Защита от шума).

Условно систему защиты строительных конструкций можно поделить на встроенную и специальную. Так, неподвижные конструкции можно спроектировать таким образом, чтобы они выполняли функцию встроенных массовых демпферов, защищающих высотные здания от силового воздействия ветра; используются различные механизмы для снижения виброактивности источника (динамические устройства) [1]. Специальная система защиты подразумевает какие-либо специальные мероприятия, механизмы или оборудование: к примеру, продольные звуковые волны, возбуждаемые бегущим магнитным полем в намагниченной жидкости, способствуют нейтрализации ударной волны при гидроударе [2], а такие устройства, как резонансные стабилизаторы волновых процессов позволяют ликвидировать отрицательное воздействие вибраций и гидроударов в трубопроводах [3].

Многообразие средств защиты подразумевает их выбор из ряда альтернатив, который лучше всего производить с помощью методов функционально-структурного анализа. Такой поиск состоит из ряда этапов, первым из которых является анализ структуры рассматриваемой системы [4, 5]. Результатом поиска, как правило, является техническое решение, отвечающее поставленным требованиям наиболее оптимальным образом.

**Цель работы** – построение структурной модели строительных конструкций с подвижными нагрузками и системой защиты и выявление наиболее рациональных методов и средств снижения негативных воздействий на строительные конструкции на основе обзора литературы по данной теме.

#### **Структура строительных конструкций с подвижными нагрузками и системой защиты**

Для осуществления полного и всеобъемлющего анализа объектов строительства применяются упрощенные схемы – модели, которые строятся на основе всевозможных способов и средств описания. Под моделью понимается воображаемое (мысленное) или графическое описание рассматриваемого объекта, служащее для анализа функционирования объекта при различных исходных данных, рассмотрения

всевозможных вариантов построения для выявления наиболее оптимального.

Построение модели является одним из наиболее эффективных средств анализа любой системы и позволяет не только выделить ее структурные и функциональные особенности, но и обнаружить возможные недостатки в структуре и функциях. В работе [6] приводится сравнительный анализ структурно-функциональной и процессной методологий графического представления модели, их положительные и отрицательные стороны. Стоит отметить, что методы функционально-структурного анализа широко применяются в различных областях, отличаются универсальностью и хорошо себя зарекомендовали. Так, например, в статье [7] приведен анализ структурно-функциональных аспектов эксплуатации инженерных систем. Показано, что при работе с различными техническими моделями функционально-структурный анализ позволяет использовать аналогичные мыслительные приемы.

Первые теоретические работы по исследованию систем с подвижными нагрузками и их влиянию на упругие конструкции принадлежат английскому ученому Х. Коксу (1848) и Р. Г. Стоксу (1849). Для анализа таких систем Э. Винклер и О. Мор в 1868 г. предложили строить особые графики, называемые линиями влияния. Наиболее полное решение задачи о движущейся силе было дано А. Н. Крыловым (1905).

Впоследствии по данной тематике было опубликовано более полутора тысяч теоретических и экспериментальных работ. Из последних можно назвать работы [8, 9], где рассматриваются инженерные сооружения с подвижными нагрузками с целью исследования собственных частот и форм колебаний. В статье [10] рассмотрены три типа задач расчета сооружений на действие подвижных нагрузок, предложены особые графики (варианты) в дополнение к традиционным линиям влияния. В работе [11] приведена методика и ее применение для анализа неразрезных сталежелезобетонных балок на подвижную нагрузку с учетом раскрытия трещин, приведены информативные смешанные линия влияния от сочетания постоянной и временной видов нагрузок. В статье [12] исследуются динамические реакции, возникающие вследствие влияния подвижной нагрузки, делается вывод, что при вертикальном воздействии горизонтальная опорная реакция весьма значительна.

Из зарубежных можно назвать работы [13, 14], в которых представлены исследования

вязкоупругих балок, подвергнутых воздействию сосредоточенной движущейся нагрузки, даны зависимости для собственных частот для широкого диапазона скоростей движущейся нагрузки. В статье [15] для оценки влияния землетрясений на сооружения используется метод конечных элементов, а в динамическом анализе учитывается эффект взаимодействия грунта и конструкции. В статье [16] приведен динамический анализ функционально-радиационных углеродных нанотрубок, армированных оболочными конструкциями с пьезоэлектрическими слоями, при динамических нагрузках.

Сравнивая различные подходы к структуре и исследованию динамики систем с подвижными нагрузками, можно сказать следующее. В простейшем виде задача о движущейся силе представляет собой взаимодействие двух тел, одно из которых перемещается по отношению к другому. Тела, взаимодействующие между собой, представляют сложную механическую систему, поэтому при исследовании воздействия одного движущегося тела на другое возникает множество самостоятельных задач. В строительстве суть этих задач заключается в следующем.

1. Перемещающееся тело можно определить как совокупность масс, неразрывно связанных друг с другом. Связи могут быть представлены в виде поршней и пружин. Поведением такой системы является колебательное движение со многими степенями свободы, которые можно определить, зная геометрические и физические параметры такой системы.

2. Если в качестве объекта рассматриваются трубопроводы, то движителем выступает само тело груза.

3. Динамика конструкций с подвижными нагрузками подразумевает контакт поверхности тел. О сложности построения математической модели говорит изменение пятна контакта, его локальность и перемещение в пространстве.

4. Сильнейшим динамическим воздействиям подвергаются покрытия взлетных полос, мосты и туннели, стенки трубопроводов. Все они находятся в контакте с подвижными нагрузками. Реакции, возникающие в этих элементах, представляют собой различного рода изгибные, сдвиговые и иные колебания. Сложный комплекс задач для исследователей представляет определение амплитуд и частот, устойчивости и неустойчивости этих колебаний, усталостной прочности и др.

Для представления перемещения частиц можно воспользоваться координатным способом. Пусть  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – координаты не-

которой точки  $M$  тела  $A$ , где  $n$  – размерность пространства;  $\rho = \rho(x, t)$  – плотность массы (в общем случае зависит и от времени);  $dV$  – элементарный объем тела в этой точке. Для частицы – элемента массы  $dm = \rho(x, t)dV$  – компоненты перемещения обозначим через  $u = (u_1(x, t), u_2(x, t), \dots, u_n(x, t))$ . Эти компоненты зависят от положения точки в пространстве и времени.

Тело состоит из бесчисленного множества точек  $M$ , поэтому при колебаниях тело обладает бесконечно большим числом степеней свободы. Более того, поскольку на тело могут быть наложены связи, его координаты не являются полностью независимыми.

Обозначим координаты точки  $K$  второго тела  $B$  через  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , через  $\rho_{пр}$  – плотность присоединенной массы, которая также может зависеть от времени.

Уравнение равновесия для элемента массы следующее:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dV = df,$$

где  $df = (df_1, df_2, \dots, df_n)$ ;  $df_i$  – компоненты вектора силы, действующие на элементарную массу  $dm = \rho(x, t)dV$ . Они обусловлены местной деформацией тела, поверхностными и объемными возмущениями, а также изменением координат во времени подвижной нагрузки  $y = y(t)$ . Если масса подвижной нагрузки весьма значительна, необходимо дополнительно учитывать силу инерции.

Используя математический аппарат тензорного исчисления, уравнение динамики можно записать в следующем виде:

$$\rho a_i = \sigma_{ij,i} + \rho F_i,$$

где  $a_i$  – компоненты вектора ускорения;  $\sigma_{ij,i}$  – компоненты тензора напряжения;  $F_i$  – компоненты вектора силы. Запятая и индекс после запятой означают производную по соответствующей пространственной переменной.

Для защиты зданий и сооружений от различных видов подвижных нагрузок и неблагоприятных факторов предусматриваются системы защиты. На рисунке 1 показаны основные структурные элементы систем с подвижными нагрузками. Данная структура позволяет представить систему с подвижными нагрузками как упорядоченную последовательность эле-

ментов и отношений между ними. Такая структура дает представление о составе материальных составляющих объекта, их основных взаимосвязях и уровнях иерархии. Обо-

щенные элементы структуры представлены независимо от вариантов их исполнения без учета каких-либо индивидуальных особенностей.



Рис. 1. Структура систем с подвижными нагрузками и защитой от вибраций

Fig. 1. Structure of systems with moving loads and vibration protection

Так, например, любое здание или сооружение в общем виде можно представить частью системы с подвижными нагрузками, включающей в себя помимо рассматриваемого объекта источник колебаний (или вибрации) и систему защиты от данных воздействий. Рассматриваемый объект (здание) включает в себя неподвижные конструкции (фундамент, несущие стены, перекрытия и др.), которые крепятся к основанию (земле), а также инженерные системы и оборудование. И грунт, и инженерные системы являются, в свою очередь, источниками вибраций.

Рассмотренная данным образом структура представляет собой основу для построения подробной структурной модели.

В первую очередь рассматриваются элементы системы, являющиеся, с одной стороны, частью рассматриваемого объекта, а с другой – источниками вибраций. Так, строительство зданий и сооружений начинают с анализа грунтов и оснований, а также геологических изысканий с учетом климатических условий района строительства. В статье [17] рассматриваются различные виды деформативных грунтов (насыпные грунты, суглинки мягкопластичные, текучепластичные), и предлагается замена свайным фундаментам в случае залегания неподходящих для основания пластичных и деформативных грунтов. В данной работе приводится описание метода логических построений, способствующих выявлению нетрадиционных инженерных решений, с достаточной эффективностью решающих поставленные задачи. Необходимо отметить, что методы функционально-структурного анализа позволяют исследовать объекты более широкого плана вне зависимости от их характерных особенностей.

В работе [18] описан способ определения замерзания воды в грунте, что может способствовать изменению его структуры, а также указаны максимальные и минимальные значения, при которых это происходит. Это особенно важно при анализе мерзлых грунтов, когда происходит деформация грунта [19]. В этом случае фазовый состав поровой воды является определяющим фактором, влияющим на физико-механические особенности грунтов данного типа.

Таким образом, грунт состоит из трех основных компонент – твердой, жидкой и газообразной, которые находятся в постоянном взаимодействии.

В качестве мероприятий, повышающих прочность мерзлых грунтов, предложено применение термостабилизаторов [20]. В частности в статье анализируются взаимодействия одиночных свай с промерзающим при функционировании термостабилизаторов грунтом слоя сезонного промерзания и оттаивания. В работе [21] предложены и проанализированы различные мероприятия с пучинообразованием.

Следующим важнейшим элементом здания являются его неподвижные конструкции, такие как фундамент, ограждающие конструкции, а также внутренние несущие и самонесущие конструкции. Ограждающие конструкции, такие как наружные стены и покрытия, а также внутренние (стены, перегородки, колонны, арки, балки, фермы и др.) можно сконструировать таким образом, чтобы они представляли собой встроенные массивные демпферы, защищающие высотные здания от силового воздействия ветра [22]. В статье [23] описана инновационная мембрана для высотных модульных зданий на основе конечно-элементной модели, и делается вы-

вод о том, что гибкие горизонтальные соединения снижают ветровую нагрузку.

В статье [24] исследуется работа динамических гасителей колебаний при сейсмических воздействиях большой массы. Мероприятия по снижению сейсмических и ударных воздействий системами виброзащиты за счет создания поглотителя энергии на пути распространения импульса приведены в работе [25]. В статье [26] описаны различные мероприятия по защите от землетрясений путем изоляции оснований с дополнительным демпфированием. В статье [27] приведен способ определения сил, влияющих на структурные элементы в многоэтажных зданиях от сейсмических сил.

Расчетная модель демпфированной системы с динамическим гасителем представлена двумя массами, соединенными между собой пружинами, что дает возможность учитывать демпфирование на эффективность и подбор оптимальных параметров динамических гасителей колебаний. Так, например, в работе [28] проведен анализ динамических характеристик жилых зданий с гасителями колебаний, приведены основные зависимости. В работе [29] представлено несколько типов динамических расчетов сооружений (по сейсмопрочности, сейсмоизоляции, на ветровые нагрузки) на основе современных алгоритмов и программных комплексов.

Инженерные системы и различное оборудование также являются источниками различных негативных воздействий: шума, вибраций, изменений микроклимата помещений. Следует различать оборудование и технику, непосредственно и постоянно функционирующие в помещениях согласно их назначению. В зданиях гражданского назначения это могут быть насосы, вентиляторы, кондиционеры, бытовые приборы – стиральные машины, центрифуги, холодильники и др., а также лифтовое оборудование в высотных зданиях. При этом особую опасность представляет одновременное воздействие двух и более источников вибрации.

Помимо всего перечисленного отдельно можно выделить ремонтное оборудование и технику, оказывающие временное негативное воздействие различной степени, в том числе транспорт. Так, например, в статье [30] исследуется феномен отрицательного влияния движения городского общественного и грузового транспорта и поездов метрополитена, а также погружений свай ударным методом. В качестве системы защиты и снижения негативного влияния данных факторов предлагается модифици-

ровать конструкцию дорожного полотна путем применения новейших материалов и технологий строительства, а также модификации опорных элементов рельсов. В случае вибрационных воздействий от работы строительных машин в условиях плотной городской застройки предлагается использовать вибрационные способы погружения свай методом вдавливания, завинчивания и др. В работе [31] даны сведения по итогам аналитических и экспериментальных исследований для прогнозирования динамической прочности строительных конструкций при воздействии взрывных и ударных нагрузок.

Также необходимо принимать во внимание влияние природных объектов и явлений. В статье [32] показаны воздействия речных наводнений, оползней, речной эрозии и ряда других процессов на гидротехнические сооружения и описаны методы ликвидации последствий таких воздействий.

На рисунке 2 приведена полная структурная модель систем с подвижными нагрузками.

Объектом является здание гражданского назначения (жилое или общественное). В отличие от иных наземных сооружений оно имеет внутреннее пространство, предназначенное для проживания, труда, удовлетворения различных потребностей человека и общества [33]. Здание включает в себя неподвижные конструкции (которые, в свою очередь, состоят из фундамента, ограждающих и внутренних несущих и самонесущих конструкций), инженерные системы (трубопроводы, воздуховоды, газопроводы, электрическая сеть, различное оборудование и перемещаемая среда), основание, неразрывно связанное с фундаментом здания и представляющее собой грунт со всеми присущими ему свойствами, и газовую среду, которая при определенных обстоятельствах может иметь достаточно агрессивный характер (повышенная влажность воздуха, температура и др.) и неблагоприятно влиять на функционирование всех остальных элементов здания. Так, например, в статье [34] исследуется коррозионное воздействие углекислого газа на стальное оборудование и трубопроводы в зависимости от условий эксплуатации и наличия влаги.

Источником вибраций зданий могут быть инженерные системы, грунт, различное оборудование, техника, природные объекты и явления, такие как, например, воздействие осадков, силовое воздействие ветра, инсоляция и др., газовая среда, а также большое скопление людей или животных. Поэтому в зданиях и сооружениях подразумевается система защиты.



Рис. 2. Структурная модель систем с подвижными нагрузками и защитой от вибраций

Fig. 2. Structural diagram of vibration protection means of building structures with moving loads

Систему защиты можно условно поделить на встроенную и специальную. Например, неподвижные элементы здания можно сконструировать таким образом, чтобы они представляли собой встроенные массовые демпферы, защищающие высотные здания от силового воздействия ветра; инженерные системы предусматривают установку шумоглушителей на воздуховодах, шумопоглощающих панелей, применение виброизоляции, виброоснований, плавающих полов при установке различного оборудования; используются различные устройства для снижения виброактивности источника (динамические устройства). Под специальной системой защиты подразумеваются специальные устройства и оборудование: сточные трубы, системы электрообогрева, светоотражающие покрытия и др. Специальные мероприятия могут заключаться, например, в установке магнитоэологических устройств, которые за счет образования неоднородного распределения электромагнитного поля и вязкостных свойств возбуждают в объеме намагниченной жидкости продольные звуковые волны и способствуют нейтрализации ударной волны [35].

### Выводы

1. На основе обзора литературы по вопросу строительных конструкций с подвижными нагрузками и системой защиты и, как следствие,

выявления наиболее рациональных методов и средств снижения негативных воздействий на строительные конструкции построена структурная модель строительных конструкций с подвижными нагрузками и системой защиты.

2. Рассмотрены вопросы негативного воздействия со стороны таких структурных элементов, как пластичные и вечномерзлые грунты, сейсмическое и ветровое воздействия, речная эрозия, городской транспорт, ремонтное оборудование, описаны основные мероприятия по снижению данных негативных воздействий на техническое состояние строительных объектов.

3. Выявлено, что многочисленные негативные воздействия на строительные конструкции, такие как воздействие нескольких источников вибрации, изменение температуры, влажности и др., может привести к нарушению геометрической целостности строительных конструкций, механизмов и инженерных систем.

Таким образом, в подавляющем большинстве различные источники вибрации могут быть сведены к подвижным нагрузкам.

### Библиографические ссылки

1. Khan I., Usman M., Tanveer M. Vibration control of an irregular structure using single and multiple tuned mass dampers. Proc. of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2021. DOI: 10.1680/jstbu.21.00011.

2. *Найгерт К. В., Целищев В. А.* Защита приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17, № 3. С. 70–77. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77.
3. *Сайфуллин И. Ш., Украинский Л. Е.* К вопросу о защите трубопроводных систем от действия гидроударов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 21–26. DOI: 10.31857/S023571190002557-3.
4. *Плеханов Ф. И., Пушкарев И. А., Пушкарева Т. А.* Структурный анализ способов повышения нагрузочной способности планетарных передач // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : материалы VIII Международной конференции, Ижевск, 23–24 апреля 2019 г. В 2 т. Ижевск : ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. С. 297–302.
5. *Пушкарев И. А., Дедюхина А. А., Чукавина А. А.* Структурная модель оценивания самостоятельной работы обучающихся в образовательном процессе на основе функционально-структурного анализа // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2022. Т. 18, № 1. С. 81–88. DOI: 10.22213/2618-9763-2022-1-81-88.
6. *Степанов Л. В., Серебрякова Е. А.* Сравнительный анализ структурно-функционального и процессного подходов к моделированию систем // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации : материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию юбилею филиала, Воронеж, 31 марта 2021 г. Воронеж : Научная книга, 2021. С. 569–574.
7. *Палагин А. В., Корепанов Е. В.* Анализ структурно-функциональных аспектов эксплуатации инженерных систем // Молодежь и научно-технический прогресс : сборник докладов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 18 апреля 2019 г. В 3 т. Губкин : Ассистент плюс, 2019. Т. 1. С. 97–102.
8. *Антоненко М. В., Иванкина О. П.* Расчет мостовых сооружений на действие подвижной нагрузки // Новые технологии в учебном процессе и производстве : Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Рязань, 17–19 апреля 2019 г. Рязань, 2020. С. 153–155.
9. *Иманалиев Т. О.* Расчет собственных частот и форм колебаний инженерных сооружений от подвижной нагрузки // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2019. № 4 (66). С. 571–576. DOI: 10.35803/1694-5298.2019.4.571-576.
10. *Миронов Л. П.* Задачи расчета сооружений на подвижные нагрузки // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2018. № 6. С. 131–139.
11. *Аверин А. Н., Рыдченко Д. Г., Провоторова М. В.* Расчет неразрезной сталежелезобетонной балки на подвижную нагрузку с учетом раскрытия трещин // Строительная механика и конструкции. 2019. № 4 (23). С. 63–74.
12. *Зылев В. Б., Алферов И. В.* Динамические опорные реакции в двухпролетной мостовой ферме при действии подвижной нагрузки // Строительство и реконструкция. 2019. № 2 (82). С. 20–25. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-20-25.
13. *Praharaj R., Datta N.* Dynamic response spectra of fractionally damped viscoelastic beams subjected to moving load. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020. DOI: 10.1080/15397734.2020.1725563.
14. *Ouzizi A., Abdoun F., Azrar L.* Nonlinear dynamics of beams on nonlinear fractional viscoelastic foundation subjected to moving load with variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, vol. 523, p. 116730. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116730.
15. *Pruška Ja., Pavelcová V.* Evaluation of the effect of earthquake on underground structures using the finite element method. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2021, no. 4-1, pp. 81-90. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_81.
16. *Mallek H., Jrad H., Wali M.* Dynamic analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced shell structures with piezoelectric layers under dynamic loads. *Journal of Vibration and Control*, 2020, vol. 26, no. 13-14, pp. 1157-1172. DOI: 10.1177/1077546319892753.
17. *Хрусталева А. А.* Проектирование зданий в условиях деформативных грунтов, методом замены геологических слоев грунта // Инновации и инвестиции. 2022. № 4. С. 260–262.
18. *Колунин В. С., Ишкова З. А.* Метод начала кристаллизации воды для определения температуры начала замерзания грунтов // Криосфера Земли. 2019. Т. 23, № 6, С. 3–7. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-6(3-7).
19. *Кузьмин Г. П., Слепцова Ю. Г.* Определение количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах по деформации образца // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 1. С. 4–9. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-4-9.
20. *Алексеев, А. Г.* Воздействие морозного пучения грунта на сваи при работе термостабилизаторов // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 6 (287). С. 57–64.
21. *Слепцов Н. В., Туякова А. К.* Классификация мероприятий ликвидации пучин по генетическому типу увлажнения грунта в теле земляного полотна // Сборник материалов Всероссийского форума «Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера» и Недели студенческой науки автотранспортного факультета СВФУ. Якутск : Издательский дом СВФУ, 2018. С. 221–225.
22. *Elias S., Rupakhety R., Olafsson S.* Tuned mass dampers for response reduction of a reinforced concrete chimney under near-fault pulse-like ground motion. *Earthquake Engineering Research Centre, Faculty of Civil and Environmental: Engineering, School of Engineering and Natural Science, University of Iceland, Reykjavik, Iceland*, 2020. DOI: 10/3389/fbuil.2020.00092.
23. *Pan W., Wang Z., Zhang Y.* Novel discrete diaphragm system of concrete high-rise modular buildings.

*Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 51, p. 104342. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104342.

24. Влияние способа учета демпфирования на оптимизацию параметров динамического гасителя колебаний / О. П. Нестерова, А. М. Уздин, М. Ю. Федорова, Л. Хонг // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 6. С. 29–44. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-6-29-44.

25. Кутуев М. Д., Матозимов Б. С., Бекешова Д. А. Моделирование и исследование динамики жилых зданий с гасителями колебаний // Материаловедение. 2018. № 2 (26). С. 58–62.

26. Brysin A.N., Solovyev V.C., Mikayeva S.A., Niki-forov A.N. Seismic and shock effects reduction by vibration protection systems equipped with amplifiers of inertial characteristics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, 01-05 октября 2019 г., vol. 698 (2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019, p. 022049. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022049.

27. De Domenico D., Ricciardi G. Earthquake protection of existing structures with limited seismic joint: Base isolation with supplemental damping versus rotational inertia. *Advances in Civil Engineering*, 2018, vol. 2018. DOI: 10.1155/2018/6019495.

28. Тарануха Н. Л., Ибрагим А. Сейсмический анализ зданий для защиты от землетрясений // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2018. № 1 (32). С. 113–116.

29. Рутман Ю. Л., Островская Н. В. Динамика сооружений: сейсмостойкость, сейсмозащита, ветровые нагрузки : монография. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. 253 с. ISBN: 978-5-9227-0929-3.

30. Анфилатов Н. А. Аспекты негативного воздействия вибрации на здания и сооружения и людей, находящихся в них // Химия. Экология. Урбанистика. 2019. Т. 2019-2. С. 17–21.

31. Анализ динамической прочности строительных конструкций на взрывные и ударные нагрузки расчетно-экспериментальным методом : монография / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, А. С. Пляскин [и др.]. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. 164 с. ISBN: 978-5-93057-998-7.

32. Говорушко С. М. Влияние природных процессов на гидротехнические сооружения (сообщение 2) // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 2 (50). С. 75–87.

33. Волкова Н. Г., Цешковская Е. Ю. Экологические аспекты микроклимата жилых и общественных зданий // Строительство и реконструкция. 2020. № 5 (91). С. 97–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-97-105.

34. Kantuykov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, no. 11, pp. 793-801. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-11-793-801.

35. Найгерт К. В., Целищев В. А. Защита приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17, № 3, С. 70–77. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77.

## References

1. Khan I., Usman M., Tanveer M. Vibration control of an irregular structure using single and multiple tuned mass dampers. *Proc. of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2021. DOI: 10.1680/jstbu.21.00011.

2. Naigert K.V., Tselishchev V.A. [Protection of drive systems from hydro-impact by magnetorheological devices]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 70-77 (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77.

3. Sayfullin I.Sh., Ukrainskiy L.E. [On the issue of protecting pipeline systems from the action of water hammer]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 6. pp. 21-26 (in Russ.). DOI: 10.31857/S023571190002557-3.

4. Plekhanov F.I., Pushkarev I.A., Pushkareva T.A. [Structural analysis of ways to increase the load capacity of planetary gears]. *Tekhnicheskie universitety: integratsiya s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovaniya : materialy VIII Mezhdunarodnoj konferencii*, Izhevsk, 23-24 aprelja 2019 g. Izhevsk, Kalashnikov ISTU, 2019, pp. 297-302 (in Russ.).

5. Pushkarev I.A., Dedyukhina A.A., Chukavina A.A. [Structural model of estimation of independent work of students in the educational process based on functional and structural analysis]. *Sotsialno-ekonomicheskoye upravleniye: teoriya i praktika*, 2022, vol. 18, no. 1. pp. 81-88 (in Russ.). DOI: 10.22213/2618-9763-2022-1-81-88.

6. Stepanov L.V., Serebryakova E.A. [Comparative analysis of structural-functional and process approaches to system modeling]. *Obshchestvo i ekonomicheskaya mysl v XXI v.: puti razvitiya i innovatsii : materialy IKN Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letnemu yubileyu filiala, Voronezh*, 31 marta 2021 g. Voronezh : Nauchnaya kniga, 2021, pp. 569-574 (in Russ.).

7. Palagin A.V., Korepanov E.V. [Analysis of the structural and functional aspects of the operation of engineering systems]. *Youth and scientific and technical progress: a collection of reports of the XII International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists*, Gubkin, 18 April 2019. In 3 volumes. Gubkin : Assistant Plus, 2019, vol. 1, pp. 97-102 (in Russ.).

8. Antonenko M.V., Ivankina O.P. [Calculation of bridge structures for the action of a moving load]. *Novyye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve : materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Ryazan, 17-19 aprelja 2019 g. Ryazan, 2020, pp. 153-155 (in Russ.).

9. Imanaliyev T.O. [Calculation of natural frequencies and vibration modes of engineering structures from a moving load]. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*, 2019, no. 4 (66), pp. 571-576 (in Russ.). DOI: 10.35803/1694-5298.2019.4.571-576.
10. Mironov L.P. [Tasks of calculating structures for moving loads]. *Proyektirovaniye razvitiya regional'noy seti zheleznnykh dorog*, 2018, no. 6, pp. 131-139 (in Russ.).
11. Averin A.N., Rydchenko D.G., Provotorova M.V. [Calculation of a continuous steel-reinforced concrete beam for a moving load, taking into account the opening of cracks]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii*, 2019, no. 4 (23), pp. 63-74 (in Russ.).
12. Zylev V.B., Alferov I.V. [Dynamic support reactions in a two-span bridge truss under the action of a moving load]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2019, no. 2 (82), pp. 20-25 (in Russ.). DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-20-25.
13. Prahraj R., Datta N. Dynamic response spectra of fractionally damped viscoelastic beams subjected to moving load. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020. DO: 10.1080/15397734.2020.1725563.
14. Ouzizi A., Abdoun F., Azrar L. Nonlinear dynamics of beams on nonlinear fractional viscoelastic foundation subjected to moving load with variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, vol. 523, p. 116730. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116730.
15. Pruška Ja., Pavelcová V. Evaluation of the effect of earthquake on underground structures using the finite element method. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2021, no. 4-1, pp. 81-90. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_81.
16. Mallek H., Jrad H., Wali M. [Dynamic analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced shell structures with piezoelectric layers under dynamic loads]. *Journal of Vibration and Control*, 2020, vol. 26, no. 13-14, pp. 1157-1172. DOI: 10.1177/1077546319892753.
17. Khrustalev A.A. [Designing buildings in conditions of deformable soils by replacing the geological layers of the soil]. *Innovatsii i investitsii*, 2022, no. 4, pp. 260-262 (in Russ.).
18. Kolumin V.S., Ishkova Z.A. [Water crystallization onset method for determining soil freezing onset temperature]. *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 3-7 (in Russ.). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-6(3-7).
19. Kuzmin G.P., Slepsova Yu.G. [Determination of the amount of unfrozen water in frozen soils by sample deformation]. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 4-9 (in Russ.). DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-4-9.
20. Alekseyev A.G. [Influence of frost heaving of soil on piles during the operation of thermal stabilizers]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2019, no. 6 (287), pp. 57-64 (in Russ.).
21. Slepsov N.V., Tuyakova A.K. [Classification of actions for the liquidation of deeps according to the genetic type of soil moisture in the body of the subgrade]. *Sbornik materialov Vserossiyskogo foruma «Transportnyye sistemy i dorozhnaya infrastruktura Kraynego Severa» i Nedeli studencheskoy nauki avtodorozhnogo fakulteta SVFU. Yakutsk : Izdatelskiy dom SVFU*, 2018, pp. 221-225 (in Russ.).
22. Elias S., Rupakhety R., Olafsson S. Tuned mass dampers for response reduction of a reinforced concrete chimney under near-fault pulse-like ground motion. *Earthquake Engineering Research Centre, Faculty of Civil and Environmental: Engineering, School of Engineering and Natural Science, University of Iceland, Reykjavik, Iceland*, 2020. DOI: 10/3389/fbuil.2020.00092.
23. Pan W., Wang Z., Zhang Y. Novel discrete diaphragm system of concrete high-rise modular buildings. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 51, p. 104342. DOI: 10.1016/j.job.2022.104342.
24. Nesterova O.P., Uzdin A. M., Fedorova M.Yu., Khong L. [Influence of the damping accounting method on the optimization of the parameters of a dynamic vibration damper]. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy*, 2021, no. 6, pp. 29-44 (in Russ.). DOI: 10.37153/2618-9283-2021-6-29-44.
25. Kutuyev M.D., Matozimov B.S., Bekeshova D.A. [Modeling and studying the dynamics of residential buildings with vibration dampers]. *Materialovedeniye*, 2018, no. 2 (26), pp. 58-62 (in Russ.).
26. Brysin A.N., Solovyev V.C., Mikayeva S.A., Nikiforov A.N. Seismic and shock effects reduction by vibration protection systems equipped with amplifiers of inertial characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, October 01-05, 2019, vol. 698 (2)*. Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019, p. 022049. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022049.
27. De Domenico D., Ricciardi G. Earthquake protection of existing structures with limited seismic joint: Base isolation with supplemental damping versus rotational inertia. *Advances in Civil Engineering*, 2018, vol. 2018. DOI: 10.1155/2018/6019495.
28. Taranukha N.L. Ibrakhim A. [Seismic analysis of buildings for earthquake protection]. *Social'no-ekonomicheskoye upravleniye: teoriya i praktika*, 2018, no. 1 (32), pp.113-116 (in Russ.).
29. Rutman Yu.L., Ostrovskaya N.V. [Dynamics of structures: seismic stability, seismic protection, wind loads: monograph]. *Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet*, 2019 g. Sankt-Peterburg, 253 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-9227-0929-3.
30. Anfilatov N.A. [Aspects of the negative impact of vibration on buildings and structures and people in them]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*, 2019, vol. 2019-2, pp. 17-21.
31. Belov N.N., Yugov N.T., Plyaskin A.S. [and others]. [Analysis of the dynamic strength of building structures for explosive and shock loads by the calculation and experimental method: monograph]. *Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet*, 2021 g. Tomsk, 164 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-93057-998-7.
32. Govorushko S.M. [Influence of natural processes on hydraulic structures]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniy*, 2019, no. 2 (50), pp. 75-87 (in Russ.).
33. Volkova N.G., Tseshkovskaya E.Yu. [Ecological aspects of the micro-climate of residential and public buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2020, no. 5 (91),

pp. 97-105 (in Russ.). DOI: 10.33979/2073-7416-2020-91-5-97-105.

34. Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, no. 11, pp. 793-801. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-11-793-801.

35. Naigert K.V., Tselishchev V.A. [Protection of drive systems from hydro-impact by magnetorheological devices]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 70-77 (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-70-77.

### Structural Diagram of Vibration Protection Means of Building Structures with Moving Loads

I.A. Pushkarev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The methods of modeling the process of choosing methods and means of vibration protection for building structures with moving loads are considered based on a review of the literature on this topic. Structural analysis of vibration protection devices for building structures was carried out. Various options for reducing the negative impact of external influences in each specific case are proposed.*

*Currently, building structures and buildings in general are under the influence of a significant number of sources of undesirable vibrations, both natural and technogenic. For example, in residential and public buildings the number of pumps, fans, air conditioners has increased, a large number of different machines, mechanisms and equipment is used. In the process of construction, as well as repair and reconstruction, the building is subjected to shock, mass (static), vibration and other effects. The increase in the number of transport and transport networks (which themselves are systems with moving loads) passing in the immediate vicinity of buildings and structures also affect them, both acoustically and mechanically. High-rise buildings are exposed to the force of the wind, buildings located in seismically hazardous areas - to seismic effects. It should be noted that the vast majority of vibration sources can be reduced to moving loads.*

*Thus, at present, the task of reducing the impact of moving loads on building structures, and the resulting adverse factors (noise, oscillation, vibration, etc.) for comfortable living and human life is relevant.*

*To protect buildings and structures from various types of moving loads and adverse factors, protection systems are provided. The system of building structure protection from various negative impacts can be conditionally divided into built-in and special. For example, fixed building structures can be designed in such a way that they are tuned mass dampers that protect high-rise buildings from the force of wind; engineering systems provide for the installation of noise suppressors on air ducts, noise-absorbing panels, the use of vibration isolation, vibration bases, floating floors, etc. when installing various equipment. Special measures may include the installation of special protective devices on pipelines, such as resonant wave process stabilizers, magnetorheological devices, etc.*

*To select the most appropriate means of vibration protection for building structures with moving loads, it is proposed to use the methods of functional-structural analysis.*

**Keywords:** vibration protection, building structures, structural analysis, moving loads, vibrations, protection methods.

Получено 03.10.2022

#### Образец цитирования

Пушкарев И. А. Структурная схема средств виброзащиты строительных конструкций с подвижными нагрузками // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 27–36. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-27-36.

#### For Citation

Pushkarev I.A. [Structural Diagram of Vibration Protection Means of Building Structures with Moving Loads]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 27-36 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-27-36.