

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАМАТЕРИАЛОВ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. А. Митрошин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES USING METAMATERIALS: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Vasilii A. Mitroshin

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Аннотация. Ввиду уплотнения и увеличения этажности городской застройки в мире растет число исследований в области защиты зданий и сооружений от сейсмических волн, поскольку распространяющийся в массиве грунта волновой сейсмический фронт способен привести к колоссальным разрушениям и массовым жертвам. Наиболее распространенными методами сейсмозащиты зданий и сооружений в гражданском строительстве в настоящее время являются конструктивные и территориальные способы. Первый метод включает комплекс конструктивных мероприятий, среди которых важное место занимает применение сейсмоизоляторов – специальных устройств, вводимых в фундамент и снижающих инерционные сейсмические воздействия на строительные конструкции. Второй способ предполагает использование различных барьеров на пути распространения сейсмических волн. В последние годы явно обозначилась тенденция поиска новых подходов к территориальной сейсмозащите. Анализ академических баз данных позволил выявить большое число исследований (преимущественно зарубежных), посвященных разработке способов защиты зданий и со-

Abstract. Due to the compaction of urban development and increase in its number of floors, the number of studies in the field of protection of buildings and structures from seismic waves is growing in the world, as the wave seismic front in the soil mass can lead to enormous destruction and mass casualties. The most common methods of seismic protection of buildings and structures in civil engineering today are constructive and territorial methods. The first method includes a set of structural measures, among of them an important place is occupied by the use of seismic isolators – special devices inserted into the foundation and reducing inertial seismic effects on building structures. The second way is the use of various barriers in the path of seismic wave propagation. In recent years, there has been a clear trend towards finding new approaches to territorial seismic protection. The analysis of academic databases revealed a large number of studies (mostly foreign) devoted to the development of ways to protect buildings and structures from wave action using various kinds of composite structures – metamaterials. Some researchers conditionally divide these methods into two groups: the first performs the tasks of masking,

оружий от волнового воздействия с помощью различного рода композиционных структур – метаматериалов. Эти способы некоторые исследователи условно делят на две группы: одни выполняют задачи маскировки, когда волновой фронт отклоняется и огибает защищаемый объект, другие создают искусственную теньюую зону, в которой сейсмические волны затухают, не оказывая существенного влияния на здания и сооружения. Так как для российской науки разработка сейсмических метаматериалов пока является новым, но, безусловно, перспективным направлением исследований, целью данного обзора была систематизация имеющихся сведений о способах эффективной защиты зданий и сооружений от волновых воздействий.

Ключевые слова: метаматериалы, сейсмические волны, искусственный барьер, затухание волн, аналитический обзор

when the wave front deviates and wraps around the protected object, and the second creates an artificial shadow zone where seismic waves are damped without significantly affecting buildings and structures. Since the development of seismic metamaterials is still a new but certainly promising area of research for Russian science, the purpose of this review was to systematise the available data on the methods of effective protection of buildings and structures from wave impacts.

Key words: metamaterials, seismic waves, artificial barrier, seismic-waves attenuation, analytical review

Для цитирования: Митрошин, В. А. Сейсмическая защита зданий и сооружений с применением метаматериалов: текущее состояние и перспективы развития / В. А. Митрошин. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 67–83.

For citation: Mitroshin, V. A. (2024). Seismic protection of buildings and structures using metamaterials: current status and development prospects. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 67-83. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83.

1. Введение

В настоящее время многие ведущие научно-исследовательские институты и лаборатории мира занимаются проблемами защиты зданий от сейсмических волн с помощью метаматериалов, которые используются в качестве барьера на пути сейсмического волнового фронта. Метаматериал – это композиционный материал, свойства которого могут быть заранее заданы путем внедрения в исходный природный материал различных структур разнообразных форм и конфигураций. Компоненты метаматериала, готовые микро- или макроструктуры, называются метаатомами. Подробное рассмотрение современного состояния данного вопроса и являлось

целью данного обзора. В качестве исходных данных использовались исследовательские и обзорные материалы по теме статьи. Поиск источников осуществлялся в базах Elibrary (на русском языке) и Google Scholar (на английском языке). Итоговая выборка содержала в себе труды преимущественно с 2006 по 2020 год. Для подбора релевантных публикаций использовались следующие ключевые слова: seismic metamaterials/сейсмические метаматериалы, seismic-waves attenuation/ослабление сейсмических волн, soil-structure interaction/взаимодействие грунт – сооружение и др. Предпочтение отдавалось публикациям, в которых содержались результаты численных или натуральных экспериментов.

Прежде чем перейти к рассмотрению известных способов сейсмической защиты с применением метаматериалов, кратко изложим основы метода волнового обтекания и осветим результаты первых наиболее значимых теоретических исследований.

Метод волнового обтекания

Согласно [1–3], задача маскирующего покрытия состоит в искривлении фронта падающего излучения, чтобы за маскируемым объектом лучи принимали прежнее направление. Оптическая длина пути каждого луча должна быть одинаковой и такой, будто на пути фронта препятствие отсутствует. Основная идея метода состоит в применении материалов, обладающих неоднородностью внутреннего строения. Один из первых экспериментов по применению метаматериалов в качестве маскирующего покрытия провели ученые-физики из Великобритании Дж. Пендри и Д. Шуриг [1, 4]. Речь идет о так называемой электромагнитной маскировке, при которой маскируемый объект становится фактически невидимым для падающего излучения. Проектирование маскирующей оболочки основывается на координатном преобразовании, с помощью которого пространство вокруг маскируемого тела трансформируется в оболочку. В теоретической части исследования показано, что вследствие инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований координат

нат затронуты будут лишь компоненты тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости. Благодаря этим сложным свойствам материала получаемое маскирующее покрытие (оболочка), включая скрываемый объект, становится фактически невидимым извне. Таким образом, маскировка не рассеивает волны и не оставляет тени в пропускном излучении.

В натурном эксперименте [5] маскирующее покрытие было выполнено в виде оболочки из десяти слоев высотой в три элементарные ячейки каждый. На рис. 1 показаны разрез экспериментальной установки, структура маскирующего покрытия и форма элементарной ячейки. Одна ячейка – так называемый резонатор, параметры которого были специальным образом откалиброваны.

Размеры резонатора приняты следующими: $a_\theta = a_z = 10/3$ мм, $a_r = 10/\pi$ мм. Параметры диэлектрической и магнитной проницаемости настраивались с помощью варьирования геометрических размеров s и r (рис. 1с), которые смещают частоты электрического и магнитного резонансов (с учетом компенсации некоторого перекрестного влияния).

Следует отметить, что радиусы слоев были подобраны таким образом, чтоб на длине окружности помещалось целое число резонаторов. Маскируемым объектом в данном эксперименте выступал полый проникаемый цилиндр. Микроволны подавались через специальный коакси-

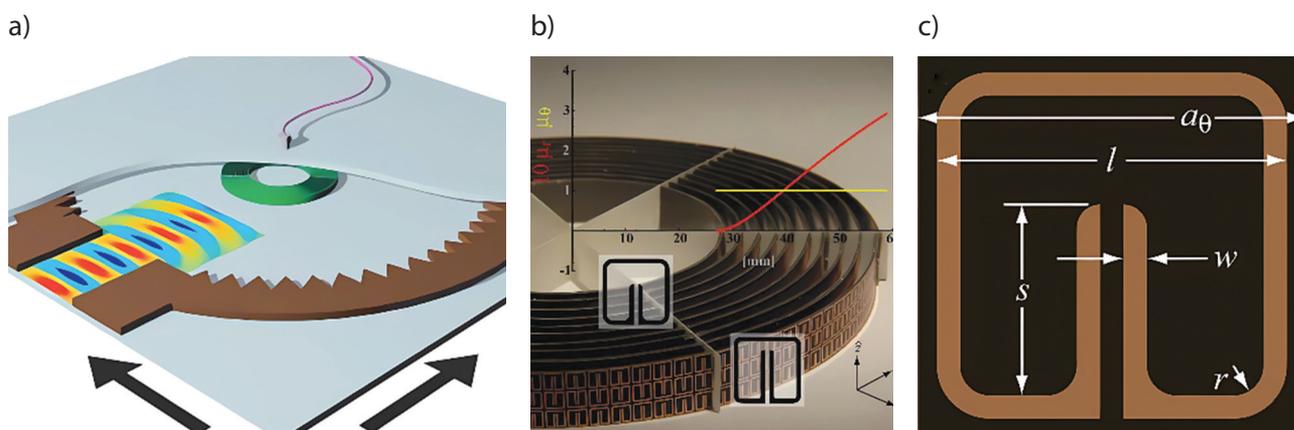


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) 3D-модель в разрезе; б) структура маскирующего покрытия (поступающие по волноводу микроволны отмечены цветными полосами); в) форма элементарной ячейки [5]
 Fig. 1. Experimental setup: a) 3D model in section; б) structure of the masking coating (microwaves coming through the waveguide are marked with coloured stripes); в) shape of the unit cell [5]

альный волновод, прикрепленный к нижней пластине. Испытуемые образцы помещались в центр экспериментальной установки и облучались микроволнами на дискретном наборе частот, который включал также ожидаемую рабочую частоту маскирующего покрытия. На каждой частоте проводился ряд измерений. Анализ данных показал, что частота 9.5 ГГц – оптимальная. Это практически совпало с расчетами. На рис. 2 проиллюстрированы зависящие от времени стационарные характеристики электрического поля с линиями, показывающими направление потока энергии поля для цилиндра без маскирующего покрытия и для цилиндра с маскировкой. Результаты эксперимента подтвердили принципиальную возможность создания маскирующих покрытий из метаматериалов с заранее заданными свойствами, хотя и не без некоторых приближений вследствие несовершенства технологий и расчетных моделей.

Эксперимент с использованием маскирующего покрытия в виде цилиндрической оболочки положил начало исследованиям, посвящен-

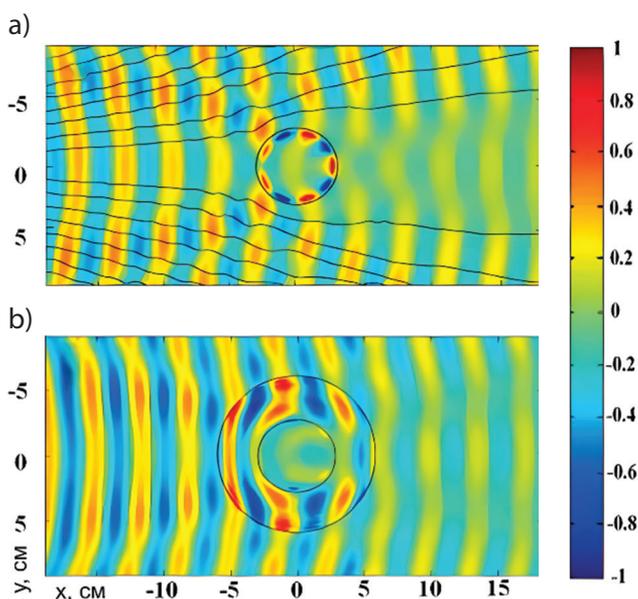


Рис. 2. Графики зависящих от времени стационарных характеристик электрического поля: а) без маскирующего покрытия; б) с маскирующим покрытием [2], [5]
 Fig. 2. Diagrams of stationary characteristics of the electric field depend on time: a) without masking coating; b) with masking coating [2], [5]

ным применением других форм покрытий: сфер, эллиптических цилиндров [6], произвольных цилиндров [7], трехмерных оболочек [8, 9] и др.

В настоящем обзоре акцент сделан на применении метаматериалов для сейсмической защиты зданий и сооружений.

2. Основная часть

Создание искусственных барьеров из метаматериалов

Ввиду невозможности контролировать распространение сейсмического фронта традиционные проектные решения, направленные на повышение устойчивости зданий и сооружений к вибрациям или воздействиям сдвиговых волн, не способны обеспечить полноценную защиту. Более эффективными, по мнению авторов [10], являются такие методы борьбы с разрушительным действием землетрясений с применением акустических метаматериалов, как отражение и ослабление волнового фронта. Первый способ основан на отводе набегающих волн от фундамента здания, хотя отраженные сейсмические волны все еще остаются опасными для окружающих строений. Второй способ предполагает создание искусственной теневой зоны с помощью специальных свойств метаматериалов с целью ослабления падающих волн.

В [10] авторы приводят формулу для определения эффективного модуля сдвига упругого материала, реализуемого путем пропускания волн через массив резонаторов Гельмгольца. При достижении отрицательных значений данного модуля сдвига E происходит гашение амплитуды сейсмических волн:

$$E_{eff}^{-1} = E^{-1} \left[1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \right], \quad (1)$$

где ω , ω_0 – циклическая и резонансная частота, Γ – вязкие потери, F – геометрический параметр.

Энергия сейсмических волн рассеивается внутри специальных метаконтейнеров, а поглощенная энергия превращается в звук и тепло.

Сейсмический барьер состоит из множества подобных резонаторов вокруг фундамента защищаемого здания. Амплитуда сейсмической волны, проходящей через метаконтейнеры, уменьшается в диапазоне частот отрицательного E .

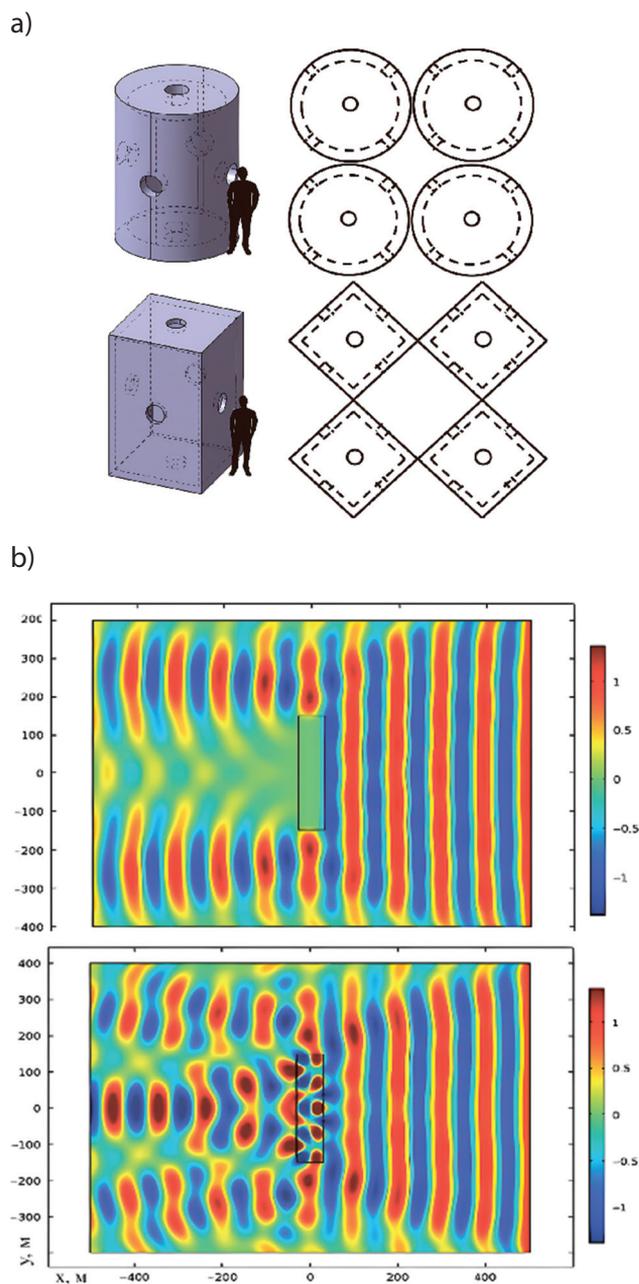


Рис. 3. Искусственный барьер из метаконтейнеров: а) общий вид; б) результаты численного моделирования [10]

Fig. 3. Artificial barrier constructed of metacontainers: a) general view; b) results of numerical modelling [10]

Использование различно настроенных резонаторов позволяет покрыть максимально широкий диапазон частот. Метаконтейнер может быть любой формы (например, полый цилиндр или параллелепипед) с несколькими боковыми отверстиями. На рис. 3а показан общий вид метаконтейнеров в сравнении с человеческой фигурой (в масштабе), а также их возможное взаимное расположение в составе защитной конструкции. Чем больше геометрический параметр F , тем больший диапазон частот способен охватить барьер.

Численный эксперимент, проведенный с помощью программного комплекса COMSOL, показал, что за массивом резонаторов образовалась теневая зона (рис. 3б). У обыкновенных заграждений такого эффекта не было.

Следует отметить, что для эффективной защиты зданий и сооружений длина подобных барьеров должна значительно превышать габариты защищаемого строения из-за эффекта дифракции с обеих сторон барьера (рис. 4).

Натурных экспериментов по данной теме не проводилось.

Влияние лесов на затухание волн Рэлея

В работе [11] представлены результаты численных и натурных экспериментов по исследованию взаимодействия распространяющихся в мягкой осадочной почве на частотах ниже 150 Гц волн Рэлея с лесопосадкой. Геофизическое исследование было проведено в небольшом (около 60 тыс. м²) хвойном лесу неподалеку от Университета Жозефа Фурье в Гренобле (Франция). Два трехкомпонентных сейсмодатчика $S1$ и $S2$ в режиме реального времени записывали показания в двух разных точках в течение одного часа. Датчик $S2$ находился достаточно далеко от лесного массива, а датчик $S1$ – в глубине лесной посадки (рис. 4а).

Анализ результатов измерений выявил два явных минимума на графике в частотах между 30 и 45 Гц, а также 90 и 110 Гц. Энергия колебаний, проходящих сквозь лес на этих частотах, уменьшается в 6 раз.

Экспериментальная площадка имела простые геологические условия. Лес располагался

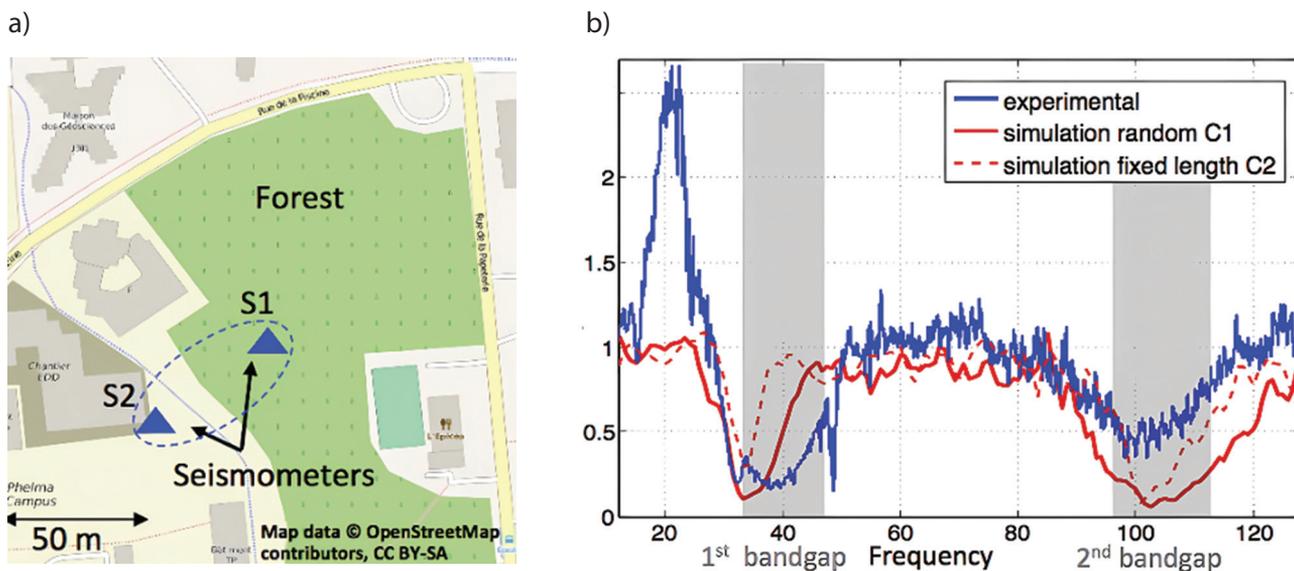


Рис. 4. Исследование взаимодействия волн Рэлея с лесопосадкой:
 a) расположение сейсмометров; b) сравнение результатов численного и натурного экспериментов [11]
 Fig. 4. Study of Rayleigh waves interaction with forest plantation:
 a) location of seismometers; b) comparison of results of numerical and in-situ experiments [11]

на сравнительно ровной геологически однородной площадке, что облегчило процесс моделирования и последующего сравнения результатов.

В численном эксперименте деревья моделировались однородными упругими вертикальными резонаторами постоянной толщины и, следовательно, постоянного поперечного сечения. Неоднородность природного леса учитывалась резонаторами разной высоты (средний размер $14 \text{ м} \pm 2.5 \text{ м}$). Расстояние между резонаторами принималось случайным (на рис. 4b сплошная кривая C1), а также фиксированным (на рис. 4b прерывистая кривая C2). Плотность древесины была принята равной 450 кг/м^3 .

Численный эксперимент показал, что искусственно созданный локально резонирующий метаматериал, состоящий из вертикальных резонаторов, обладает динамическими свойствами, аналогичными свойствам деревьев. Необходимо заметить, что при варьировании размеров и месторасположений деревьев (сплошная кривая C1) ширина зоны ослабления сигнала больше, чем при однородной конфигурации лесного массива (прерывистая кривая C2). Эти эксперименты позволяют осторожно выдвинуть предпо-

ложение, что различные метаматериалы можно использовать для создания защиты зданий и сооружений от упругих волн.

В целом лесные деревья считаются эффективным средством смягчения вибраций, распространяющихся в неглубоко залегающих слоях земной коры. В некоторых работах по данной тематике лесные массивы называют *естественным метаматериалом*. Данное определение не очень точно описывает суть современных метаматериалов, тем не менее, динамические процессы, происходящие в массиве грунта под лесопосадкой в момент прохождения волнового фронта, близки к аналогичным процессам в случае использования искусственных барьеров из метаматериалов.

Затухание поверхностных волн, проходящих через барьер из метаматериалов

Полученные в ходе натуральных экспериментов результаты исследований затухания поверхностных волн, проходящих сквозь барьер из метаматериалов, изложены в [12, 13]. В [12] исследована возможность применения метаматериалов не только для высокочастотных антропогенных источников (взрывов, свабойной вибрации, передвижений и операционной деятельности тяжелой

строительной техники и пр.), но и для низкочастотных диапазонов землетрясений 0.1–50 Гц. Авторам [12] представляется возможным использовать искусственный анизотропный слой для воздействия на проходящие сквозь него сейсмические волны. Поскольку грунты весьма неоднородны, а их характеристики различны, для корректного учета максимально возможного числа параметров в модели потребовалось провести предварительные полевые испытания с целью уточнить необходимые характеристики грунта. В дальнейших расчетах использовалась следующая приближенная модель пластины Миндлина:

$$kh \left(\nabla \cdot \mu \nabla \Psi + \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \rho h \omega^2 \Psi = 0,$$

$$\nabla \cdot D(1-\nu) \nabla u + \frac{\partial}{\partial x} \left[D(1+\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - 2k\mu h \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} + u \right) + \frac{\rho h^3}{6} \omega^2 u = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D(1-\nu) \nabla v + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(1+\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - 2k\mu h \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} + v \right) + \frac{\rho h^3}{6} \omega^2 v = 0,$$

где k, μ, ρ, ν – постоянная нормализации Миндлина ($\pi^2/12$), модуль сдвига, плотность и коэффициент Пуассона соответственно,

h – толщина плиты,
 D – жесткость плиты.

Модуль сдвига может быть вычислен по формуле:

$$\mu = E/2(1+\nu),$$

где E – модуль упругости.

Единственное дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка может быть получено для Ψ путем исключения u и v . При рассмотрении чистого изгиба (приближение Кирхгофа – Лява для тонких пластин) получается:

$$\rho^{-1} \nabla \left[\sqrt{E} \cdot \nabla \rho^{-1} \nabla \cdot \left(\sqrt{E} \nabla \Psi \right) \right] - \omega^2 \frac{\rho h}{D} \Psi = 0. \quad (3)$$

Плотность грунта была принята равной 1500 кг/м³, а в пройденных пустотах – 1.2 кг/м³. Диаметр включений составлял 0.32 м. Толщина пластины $h = 5$ м, а жесткость плиты рассчитывалась по формуле: $D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ при $E = 100$ МПа, $\nu = 0.3$.

Моделирование проводилось в программном комплексе COMSOL. Испытательная установка представляла собой заглубленный источник вибрации частотой излучения 50 Гц с боковой амплитудой 0.014 м в плоскости x - y , что должно было привести к достаточно сильному отражению поверхностных упругих волн от крупного метаматериала (барьера из цилиндрических пустот). Для измерения энергетического поля было установлено 20 трехкомпонентных датчиков. Барьер был

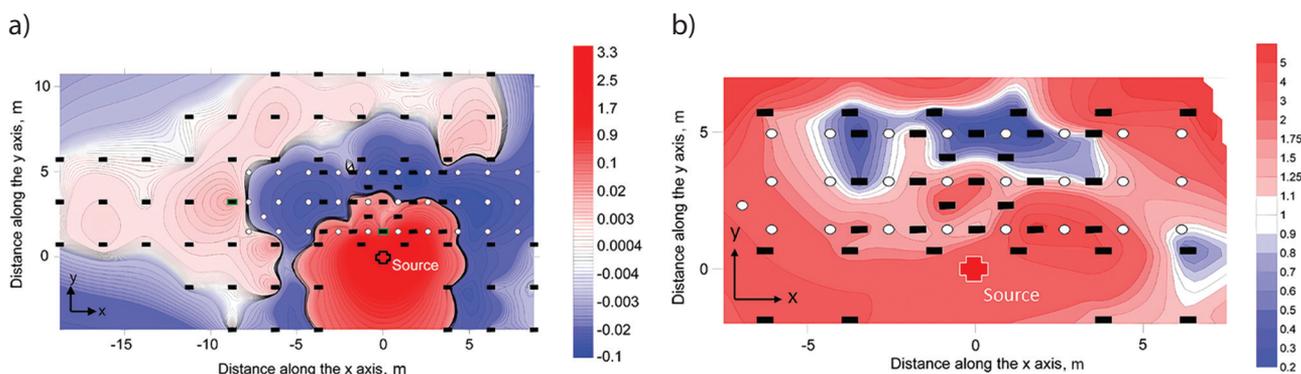


Рис. 5. Результаты эксперимента: а) измерения разности энергетических полей; б) измерения отношения энергетических полей [12]

Fig. 5. Experimental results: a) energy field difference measurements; b) energy field ratio measurements [12]

организован из регулярной сетки вертикальных цилиндрических пустот диаметром 0.32 м длиной 5 м и расстоянием в плане около 1.73 м.

На рис. 5 показаны результаты эксперимента: разность ($J_2 - J_1$) и отношение (J_2/J_1) измеренной энергии после (J_2) и до (J_1) устройства скважин. На рисунке датчики показаны черными прямоугольниками, скважины – белыми окружностями, источник вибрации обозначен красным крестом.

Следует отметить, что численное моделирование перед проведением эксперимента не учитывало вязкоупругие свойства грунта, которые проявились в процессе полевых измерений. На рис. 5а показана концентрация энергии вблизи источника вибрации в радиусе примерно 5 м, сильно затухающей по мере удаления от него в сторону защищаемой конструкции. В этой области и вблизи источника разница между измеренным энергетическим полем до и после бурения скважин может достигать двойки, что подтверждает эффекты отражения и поглощения поверхностных волн сейсмическим метаматериалом (термин из [12, 13]). Измеряемый сигнал едва преодолевает второй ряд полостей, что свидетельствует об эффективности предлагаемого решения. Также в выводах рассматриваемой публикации отмечается, что для сейсмической защиты здания расположение скважин может и не быть строго упорядоченным.

Особенности проектирования одномерных метаматериалов для сейсмической защиты

Обобщим некоторые понятия, рассмотренные в предыдущих разделах. Метаматериалы относятся к искусственно созданным структурам с заранее заданными характеристиками и периодическим внутренним строением. С помощью специальным образом заданных параметров метаматериала можно «запретить» прохождение сквозь него волн на определенных частотах. В литературе на английском языке эти «запрещенные» частоты называются термином «bandgaps», дословно перевести который можно как «разрыв диапазона». Первые исследования в этой области были посвящены прежде всего электромагнитным метаматериалам [14–20]. Впоследствии

был предложен термин «*фотонный кристалл*» для явления контроля спонтанного излучения и локализации света в трехмерных неупорядоченных материалах. Распространение частиц подавлялось фотонным кристаллом, особенностью которого являлось наличие так называемых запрещенных диапазонов, в которых световые волны распространяться не в состоянии.

Подобно фотонным кристаллам, подавляющим световое излучение, можно также управлять распространением механических волн с помощью акустических метаматериалов, называемых *фононными кристаллами*. Термин «фонон» относится к материалам, предназначенным для контроля направления и управления акустическими волнами в газах, жидкостях или твердых телах. Диапазон запрещенной зоны определяется геометрией конструкции и характеристиками самого метаматериала. Таким образом, задача подавления волнового фронта с помощью элементов, размеры которых сравнимы с размерами самой волны, в данном случае не является неразрешимой. В то же время фононные и фотонные кристаллы изготавливаются из разных исходных материалов и обладают разными свойствами. Подробно их различия описаны в [21].

Встречаются зарубежные исследования, посвященные разработке оснований и фундаментов пролетных сооружений с использованием одномерных [22, 23], двумерных [24–27] и трехмерных [28] метаматериалов для защиты от вертикальных сейсмических волн. Различные комбинации бетона, резины и стали, упорядоченные в строгом соответствии с расчетами, показали неплохую способность к подавлению падающих волн в частотах, близких к спектру сейсмических волн. Экспериментальные исследования на масштабных моделях описаны в [23, 27, 28]. В целом, проектирование барьеров с использованием метаматериалов имеет целью рассеяние сейсмических колебаний грунта и сводится к использованию массивов из резонирующих элементов, а именно: сетей из полых заглубленных цилиндров [29], специально настроенных демпферов [30], решеток из вложенных масс [31, 32], а также других поглотителей [33, 34]. Сложность состоит

в том, что множество различных резонаторов должны покрывать соответствующий типичным землетрясениям частотный диапазон. В работе [10] авторы предположили, что заглубление сравнительно больших резонаторов Гельмгольца позволит преобразовать поступающие сейсмические волны в акустическую энергию, а затем в тепло. Однако численное моделирование, проведенное в [35], лишь частично подтвердило это предположение. Анализ результатов позволяет заключить, что рассеяние возможно только на дискретных резонансных частотах. Также авторы отмечают, что волны сдвига не могут взаимодействовать с резонаторами, заполненными воздухом или жидкостью, что делает такой метод не столь эффективным для разрушительных землетрясений.

В то же время остаются нерешенными многие проблемы, связанные с сейсмозащитой зданий и сооружений. Сейсмические волны состоят из поверхностных и объемных волн. Если первый тип распространяется практически в горизонтальном направлении, то второй (объемные волны) распространяется от эпицентра к поверхности земли и может быть практически вертикальным. Большая часть исследований в сфере применения метаматериалов посвящена созданию барьеров, препятствующих поверхностным волнам.

Также отметим, что диапазон рабочих частот фоновых кристаллов значительно ниже того диапазона, в котором распространяются сейсмические волны. Длины сейсмических волн могут достигать нескольких километров. Технически создать метаматериал с запрещенной зоной таких размеров довольно трудно. Кроме того, зарубежные исследователи отмечают, что необходимо соблюдать осторожность в отношении вычисления несущей способности проектируемого фундамента с включением метаматериалов, которые влияют на устойчивость защищаемого здания. При использовании материала с очень низким модулем упругости и скоростью передачи волн такие периодические основания могут создавать дополнительные резонансные пики в диапазоне низких частот [23, 27, 28].

На основании [36] рассмотрим подробнее одномерный сейсмический метаматериал, состоящий из двух типов упругих материалов (рис. 6). Подобные слоистые структуры описываются с помощью дисперсионного соотношения, содержащего в себе информацию о параметрах и соотношениях этих параметров, составляющих структуру материалов.

Кратко обозначим основные предпосылки и результаты исследований, представленные в [36]. Одномерный слоистый метаматериал состоит из двух повторяющихся слоев, организованных в горизонтальном направлении. Толщина каждого слоя в одной ячейке метаматериала обозначена на рис. 6 как a_1 , a_2 . Падающее излучение вдоль оси x перпендикулярно плоскости слоев и описывается следующим выражением:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_i^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где i – номер слоя,
 u_i – перемещение,
 C_i – скорость волны в слое i .

Скорости продольных и поперечных волн задаются обычными для динамической теории упругости соотношениями.

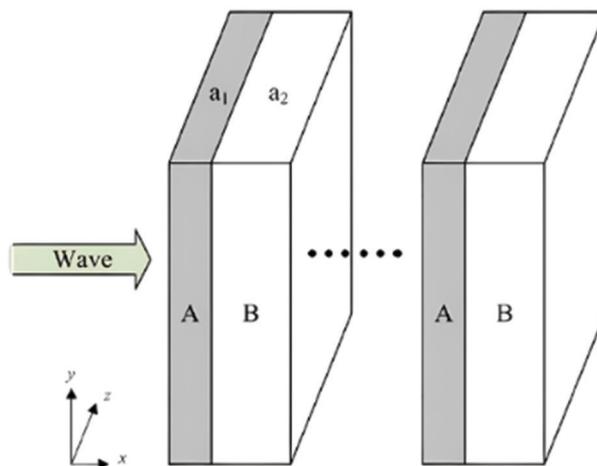


Рис. 6. Схематическое изображение одномерного сейсмического метаматериала [36]
 Fig. 6. Schematic representation of a one-dimensional seismic metamaterial [36]

Решение уравнения (4) будем искать в следующем виде:

$$u_i(x, t) = A_i e^{j(k_i x - \omega t)} + B_i e^{j(-k_i x - \omega t)}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота,
 j – мнимая единица,

$$k_i = \frac{\omega}{C_i} \text{ – волновое число.}$$

Опустив некоторые промежуточные вычисления, запишем систему гомогенных линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ -A_2 \\ -B_2 \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

где

$$M_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \rho_1 C_1 & -\rho_1 C_1 \end{bmatrix}, \quad M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \rho_2 C_2 & -\rho_2 C_2 \end{bmatrix},$$

$$M_{21} = \begin{bmatrix} e^{-j(k_1 - k)a_1} & e^{j(k_1 + k)a_1} \\ \rho_1 C_1 e^{-j(k_1 - k)a_1} & -\rho_1 C_1 e^{j(k_1 + k)a_1} \end{bmatrix},$$

$$M_{22} = \begin{bmatrix} e^{j(k_2 - k)a_2} & e^{j(k_2 + k)a_2} \\ \rho_2 C_2 e^{j(k_2 - k)a_2} & -\rho_2 C_2 e^{j(k_2 + k)a_2} \end{bmatrix}.$$

Получим следующее выражение дисперсного отношения для одномерного метаматериала:

$$\begin{aligned} \cos(ka) &= \cos \frac{\omega a_1}{C_1} \cos \frac{\omega a_2}{C_2} - \\ &- \frac{1}{2} \sin \frac{\omega a_1}{C_1} \sin \frac{\omega a_2}{C_2} \left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Частотный диапазон, соответствующий реальным значениям волновых чисел (при условии, что правая часть уравнения находится в интервале $[-1.1]$), определяется как полоса про-

пускания. И наоборот, если волновые числа являются мнимыми, тогда соответствующая частота ω оказывается в подавляемой полосе частот. Таким образом, с помощью известных значений скоростей продольных и поперечных волн можно определить комбинации полос пропускания и подавления метаматериала для P -волн и S -волн.

Исследователи пришли к следующим выводам.

1. Комбинация двух разных материалов (легкого и мягкого с тяжелым и жестким) позволяет получить широкие полосы подавления в низкочастотном диапазоне. Для достижения большего эффекта следует увеличивать соотношение прохождения волн в этих двух материалах.
2. Уменьшение плотности мягкого материала приводит к значительному увеличению ширины подавляемой частотной полосы.
3. Численное моделирование показывает хорошую способность метаматериалов к ослаблению сигнала как в установившихся процессах, так и в переходных. Кроме того, увеличение числа элементарных ячеек, а также комбинирование их различных размеров приводит к расширению зоны рабочих частот всего барьера.
4. Для подавления сейсмических волн в низкочастотном диапазоне требуется малая жесткость применяемых метаматериалов, что может накладывать довольно жесткие ограничения по размещению их в фундаментной части строений.
5. Перед барьером из метаматериалов наблюдается усиление уровня вибрации вследствие отражения волн, что может навредить окружающим зданиям и сооружениям. Еще один оригинальный способ подавления сейсмических волн с помощью V-образной конструкции из скважин, устроенных в грунте вокруг защищаемого объекта (рис. 7), предложили авторы в [35].

Идея гашения энергии сейсмических волн состоит в уменьшении амплитуды перемещения частиц грунта до достижения волнами критической инфраструктуры с помощью V-образной

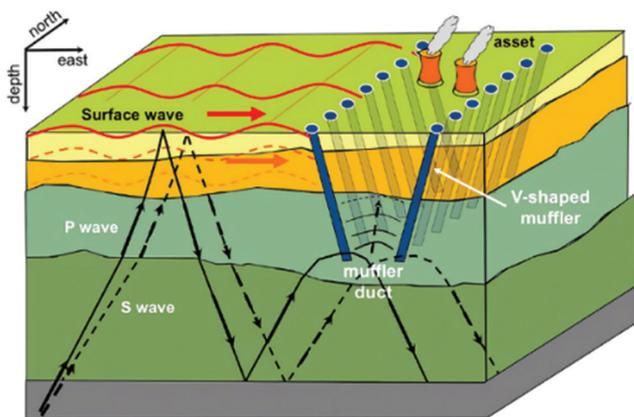


Рис. 7. Концепция массива скважин с маскирующим устройством [35]

Fig. 7. Concept of a well array with a masking device [35]

конструкции из заглубленных под определенными углами скважин расчетной длины.

В соответствии с [35], общие потери определяются как сумма потерь на входе защитной конструкции и потерь при прохождении волнового фронта через конический глушитель и описываются следующими уравнениями:

$$TL = TL_{\text{КОН}} + TL_{\text{ВХ}}, \quad (8)$$

$$TL_{\text{КОН}} = 20 \log \left(0.5 \frac{b}{t} \cdot \left[T_{11} + T_{12} \frac{4v}{\pi t^2} + T_{21} \frac{4v}{\pi b^2} + T_{22} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \right] \right), \quad (9)$$

где b – размер входа глушителя,
 T_{ij} – элементы матрицы преобразования,
 t – размер выхода глушителя.

Результат моделирования работы V-образного глушителя показан на рис. 8. Численный эксперимент проводился для четырех случаев (рис. 8а), отличающихся между собой входными размерами глушителя (0.1, 0.25, 0.35 и 0.5 км соответственно) при постоянных значениях глубины заложения скважин 0.25 км и размера выхода 0.5 км. На рис. 8 показана динамика потерь при прохождении поперечных и продольных волн для различных случаев расположения скважин в зависимости от частоты сейсмических волн.

$$TL_{\text{ВХ}} = -10 \log \left(1 - \left(\frac{0.25(k_0 b)^2 + 0.6i(k_0 b) - 1}{0.25(k_0 b)^2 + 0.6i(k_0 b) + 1} \right)^2 \right), \quad (10)$$

где k_0 – волновое число.

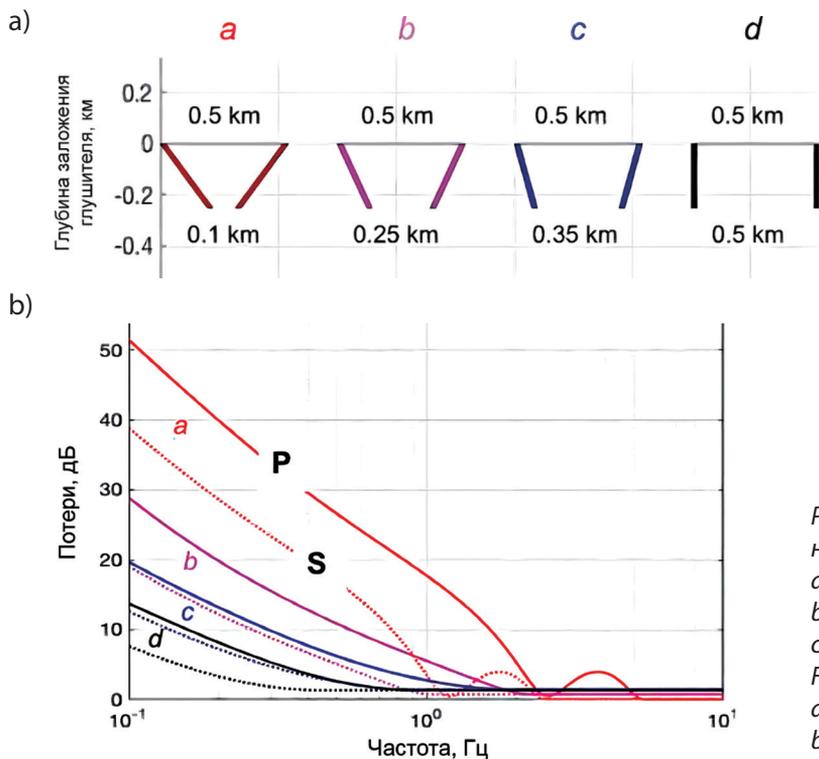


Рис. 8. Эффект глушителя, оказываемый на волновой фронт:

a) взаимное расположение скважин;

b) потери при прохождении сейсмической волны

Fig. 8. Silencer effect on the wave front:

a) relative positioning of wells;

b) seismic wave travelling losses

При анализе результатов численного моделирования были отмечены следующие тенденции:

1. Угол наклона скважин (угол вхождения) на прямую влияет на величину потерь при прохождении волнового фронта: чем угол вхождения меньше, тем потери больше, и наоборот.
2. Масштабирование внешнего (выходного) размера и глубины заложения глушителя с одним и тем же коэффициентом с неизменными размером входа и наклоном скважин практически не влияет на потери при прохождении волн сквозь глушитель.

3. Заключение

Анализ отечественных и зарубежных источников по сейсмической защите зданий и сооружений с применением метаматериалов позволил выделить следующие основные направления в исследованиях последних десятилетий.

1. *Сейсмические грунтовые метаматериалы.* В англоязычной литературе такие материалы называются Seismic Soil-Metamaterials (SSM). Их использование подразумевает создание структурированного массива грунта с устройством, например, цилиндрических пустот или жестких включений [12, 37, 38]. Главная цель – модификация сейсмического волнового фронта с помощью создания искусственной анизотропии путем внедрения в грунт геометрических элементов с регулярным или нерегулярным расположением в плане. Эффекты динамической анизотропии усиливаются локальным резонансом элементов, расположенных вдоль сетки, что в теории может привести к созданию идеальной маскировки и обвести волновой фронт вокруг защищаемой области.
2. *Заглубленные в грунт резонаторы.* В англоязычной литературе этот тип метаматериалов имеет название Buried Mass-Resonators (BMR). Данная группа сейсмических метаматериалов представляет собой заглубленные в грунт резонаторы со специально подобранным расположением и диаметром от-

верстий – аналогичным образом настраиваются на определенные частоты демпферы в высотных сооружениях. Частота демпфера или набора резонаторов настроена на определенную структурную частоту таким образом, чтобы при возбуждении этой частоты демпфер резонировал в противофазе с движением конструкции. Энергия таким образом будет рассеиваться за счет силы инерции демпфера. Некоторые исследователи [29] предлагают использовать цилиндры с различным наполнением (например, с резиной, сталью или бетоном) для ослабления как волн Рэлея, так и объемных волн в диапазоне частот 1–10 Гц. Основным недостатком данного типа локально-резонансной структуры является сложность реализации широких эффективных полос пропускания, т. к. всегда приходится выбирать между относительной шириной полосы пропускания и эффективностью подавления сигнала. Частично этот вопрос можно решить за счет увеличения числа резонаторов и расчета целых массивов таких элементов. Однако такие масштабные структуры из резонаторов сложно реализовать на практике.

3. *Резонаторы, расположенные над поверхностью грунта.* В литературе на английском языке за данной группой сейсмических метаматериалов закрепилось название Above-Surface Resonators (ASR). Преимущественно к ней относят леса, которые достаточно эффективно гасят вибрации, распространяющиеся в поверхностных слоях грунтовых массивов. Подробно исследования по этой теме представлены в [11, 39].
4. *Ауксетики (материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона).* Использование данного метаматериала, выделяемого авторами [13] в отдельный класс, основано на экстремальных свойствах структурированных сред, таких как ауксетические метаматериалы, имеющие отрицательный коэффициент Пуассона. В случае верного расчета они обеспечивают достаточно широкую запретную зону на частотах, совместимых с сейсмиче-

скими волнами. Как известно, коэффициент Пуассона – это отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению. Ауксетические материалы при растяжении расширяются (в отличие от обычных материалов, которые при растяжении истончаются). Такой элемент предназначен для создания настраиваемых эластичных ограничителей сейсмических волн.

Сейсмические волны включают в себя несколько разных компонент, среди которых продольные и поперечные волны, а также волны Рэлея и Лява. Волны Рэлея распространяются вблизи поверхности вдали от источника подземных толчков, и именно они в основном приводят к разрушению строительных конструкций вследствие своей низкой частоты, высокой амплитуды и продолжительности воздействия. Волны Лява характеризуются тем, что образуются в горизонтальном слое полупространстве, а частицы грунта при этом смещаются в горизонтальном направлении перпендикулярно направлению движения волны. В литературе редко встречаются описания землетрясений с большими разрушениями по причине волн Лява. Вследствие

этого внимание ученых сосредоточено преимущественно на разработке систем защиты от волн Рэлея в виде барьеров на пути распространения волнового фронта. Традиционные методы защиты – сейсмоизоляторы – эффективны практически всегда, за исключением случаев, при которых землетрясение генерирует колебания с энергией, сосредоточенной в небольших по времени, но больших по величине пиках.

Отметим, что для упрощения расчета большая часть существующих исследований по изучению сейсмических метаматериалов основана на использовании плоских моделей (грунт принимается в качестве однородной изотропной среды). Между тем, в реальности слоистая структура площадки может оказать существенное влияние на эффективность взаимодействия метаматериалов с волновым фронтом. В связи с этим в дальнейших исследованиях интересным представляется рассмотреть трехмерную задачу с учетом стратификации грунтов.

В заключение следует отметить, что проектирование защиты с использованием метаматериалов должно осуществляться одновременно с инженерным анализом самого защищаемого объекта.

Благодарности. Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 «Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов».

Acknowledgements. The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2023-0004 "System of territorial seismic protection of critical infrastructure based on granular metamaterials with the properties of broadband phononic crystals".

Библиографический список

1. Pendry, J. B. Controlling electromagnetic fields / J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. – DOI 10.1126/science.1125907. – Текст : непосредственный // Science. – 2006. – No. 312 (5781). – P. 1780–1782.
2. Дубинов, А. Е. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания / А. Е. Дубинов, Л. А. Мытарева. – DOI 10.3367/ufnr.0180.201005b.0475. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 475–501.
3. Розанов, Н. Н. Невидимость: за и против / Н. Н. Розанов. – Текст : непосредственный // Природа. – 2008. – № 6. – С. 3–10.
4. Schurig, D. Calculation of material properties and ray tracing in transformation media / D. Schurig, J. B. Pendry, D. R. Smith. – DOI 10.1364/oe.14.009794. – Текст : непосредственный // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 21. – P. 9794–9804.

5. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies / D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice [et al.]. – DOI 10.1126/science.1133628. – Текст : непосредственный // Science. – 2006. – Vol. 314, Issue 5801. – P. 977–980.
6. Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks / H. Ma, S. Qu, Z. Xu [et al.]. – DOI 10.1103/PhysRevA.77.013825. – Текст : непосредственный // Physical Review A – Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2008. – No. 77 (1). – P. 1–4.
7. Electromagnetic Concentrators with Reduced Material Parameters Based on Coordinate Transformation. / W. Wang, L. Lin, J. Ma [et al.]. – DOI 10.1364/oe.16.011431. – Текст : непосредственный // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, Issue 15. – P. 11431–11437.
8. Full-wave analysis of prolate spheroidal and hyperboloidal cloaks / Y. Luo, J. Zhang, H. Chen, B.-I. Wu. – DOI 10.1088/0022-3727/41/23/235101. – Текст : непосредственный // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, Issue 23. – P. 5101.
9. Interaction of an electromagnetic wave with a cone-shaped invisibility cloak and polarization rotator. / Y. Luo, J. Zhang, B.-I. Wu, H. Chen. – DOI 10.1103/PhysRevB.78.125108. – Текст : непосредственный // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. – 2008. – No. 78:125108.
10. Kim, S. H. Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials / S. H. Kim, M. P. Das. – DOI 10.1142/S0217984913501406. – Текст : электронный // Modern Physics Letters B. – 2013. – Vol. 27, No. 20:1350140.
11. Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. / A. Colombi, P. Roux, S. Guenneau [et al.]. – DOI 10.1038/srep19238. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2016. – No. 6(1):19238.
12. Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. / S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1103/PhysRevLett.112.133901. – Текст : непосредственный // Physical Review Letters. – 2013. – No. 112:133901.
13. Brûlé, S. Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives / S. Brûlé, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1016/j.physleta.2019.126034. – Текст : электронный // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. – 2020. – No. 384(1):126034.
14. Walsler, R. M. Metamaterials: What are they? What are they good for? – Текст : непосредственный // APS March Meeting Abstracts. – 2000. – No. 1. – P. 5001.
15. Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial / D. R. Smith, D. C. Vier, N. Kroll, S. Schultz. – DOI 10.1063/1.1314884. – Текст : непосредственный // Applied Physics Letters. – 2000. – No. 77(14). – P. 2246–2248.
16. Walsler, R. M. Electromagnetic metamaterials. Complex Mediums II: beyond linear isotropic dielectrics / R. M. Walsler. – DOI 10.1117/12.432921. – Текст : непосредственный // International Society for Optics and Photonics. – 2001. – No. 4467. – P. 1–15.
17. Strutt, J. W. On the Remarkable Phenomenon of Crystalline Reflexion described by Prof. Stokes. / J. W. Strutt. – DOI 10.1017/cbo9780511703980.010. – Текст : непосредственный // Scientific Papers : Cambridge Library Collection – Mathematics. – Cambridge : Cambridge University Press. – 2011. – P. 204–212.
18. Могилевский, И. Е. Математическое моделирование метода волнового обтекания в задачах маскировки / И. Е. Могилевский, В. В. Ровенко. – Текст : непосредственный // Физические основы приборостроения. – 2014. – Т. 3, № 4 (13). – С. 28–39.
19. Ohtaka, K. Energy band of photons and low-energy photon diffraction / K. Ohtaka. – DOI 10.1103/PhysRevB.19.5057. – Текст : непосредственный // Physical Review B. – 1979. – Vol. 19, Issue 10:5057.
20. Sajeev, J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices / J. Sajeev. – DOI 10.1103/PhysRevLett.58.2486. – Текст : непосредственный // Physical Review Letters. – 1987. – Vol. 58, No. 23. – P. 2486–2489.
21. Classical vibrational modes in phononic lattices: Theory and experiment. / M. Sigalas, M. S. Kushwaha, E. N. Economou [et al.]. – DOI 10.1524/zkri.2005.220.9-10.765. – Текст : непосредственный // Zeitschrift fur Kristallographie [Crystalline Materials]. – 2005. – Vol. 220, No. 9–10. – P. 765–809.
22. Bao, J. Dynamic Responses of a Structure with Periodic Foundations. / J. Bao, Z. Shi, H. Xiang. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000383. – Текст : непосредственный // Journal of Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 138, Issue 7. – P. 761–769.
23. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation / H. J. Xiang, Z. F. Shi, S. J. Wang, Y. L. Mo. – DOI 10.1088/0964-1726/21/11/112003. – Текст : непосредственный // Smart Materials and Structures. – 2012. – No. 21(11):112003.

24. Cheng, Z. Novel composite periodic structures with attenuation zones. / Z. Cheng, Z. Shi. – DOI 10.1016/j.engstruct.2013.07.003. – Текст : непосредственный // *Engineering Structures*. – 2013. – Vol. 56. – P. 1271–1282.
25. Cheng, Z. Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps. / Z. Cheng, Z. Shi, Y. L. Mo, H. Xiang. – DOI 10.1063/1.4816052. – Текст : непосредственный // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – No. 114: 033532.
26. Huang, J. Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation / J. Huang, Z. Shi. – DOI 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000193. – Текст : непосредственный // *International Journal of Geomechanics*. – 2013. – Vol. 13, No. 2 – P. 132–142.
27. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations / Y. Yan, A. Laskar, Z. Cheng [et al.]. – DOI 10.1063/1.4891837. – Текст : непосредственный // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – No. 116(4):044908.
28. Yan, Y. Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation / Y. Yan, Z. Cheng, F. Meng [et al.]. – DOI 10.1088/0964-1726/24/7/075006. – Текст : непосредственный // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 24, No. 7:075006.
29. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields / M. Miniaci, A. Krushynska, F. Bosia, N. M. Pugno. – DOI 10.1088/1367-2630/18/8/083041. – Текст : непосредственный // *New Journal of Physics*. – 2016. – No. 18(8):083041.
30. Krödel, S. Wideband-gap seismic metastructures / S. Krödel, N. Thomé, C. Daraio. – DOI 10.1016/j.eml.2015.05.004. – Текст : непосредственный // *Extreme Mechanics Letters*. – 2015. – No. 4. – P. 111–117.
31. Dertimanis, V. K. Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers / V. K. Dertimanis, I. A. Antoniadis, E. N. Chatzi. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001120. – Текст : непосредственный // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2016. – Vol. 142, Issue 9. – P. 1–10.
32. Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials / P.-R. Wagner, V. K. Dertimanis, E. N. Chatzi, J. L. Beck. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001404. – Текст : непосредственный // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2018. – Vol. 144, Issue 3. – P. 1–17.
33. Cacciola, P. Vibrating barrier: A novel device for the passive control of structures under ground motion / P. Cacciola, A. Tombari. – DOI 10.1098/rspa.2015.0075. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2015. – No. 471:2179.
34. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves / A. Palermo, S. Krödel, A. Marzani, C. Daraio. – DOI 10.1038/srep39356. – Текст : непосредственный // *Scientific Reports*. – 2016. – No. 6(1):39356.
35. Seismic cloaking protection from earthquakes / R. W. Haupt, V. Liberman, M. Rothschild, C. G. Doll. – DOI 10.1109/THS.2018.8574152. – Текст : непосредственный // *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*. – 2018. – P. 1–7.
36. Geng, Q. Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection / Q. Geng, S. Zhu, K. P. Chong. – DOI 10.1016/j.soildyn.2018.01.028. – Текст : непосредственный // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2018. – No. 107 (14). – P. 264–278.
37. Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil / S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1038/s41598-017-17661-y. – Текст : непосредственный // *Scientific Reports*. – 2017. – No. 7(1): 18066.
38. Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves? / S. Brûlé, E. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.58550/arXiv.1301.7642. – Текст : непосредственный // *arXiv*. – 2013. – No. 1301.7642.
39. A seismic metamaterial: The resonant metawedge / A. Colombi, D. Colquitt, P. Roux [et al.]. – DOI 10.1038/srep27717. – Текст : непосредственный // *Scientific Reports*. – 2016. – No. 10(6):27717.

References

1. Pendry, J. B., Schurig, D., Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), pp. 1780–1782. (In English). DOI 10.1126/science.1125907.
2. Dubinov, A. E., & Mytareva, L. A. (2010). Invisible cloaking of material bodies using the wave flow method. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 180(5), Pp. 475–501. DOI 10.3367/ufnr.0180.201005b.0475. (In Russian).
3. Rozanov, N. N. (2008). Nevidimost': za i protiv. *Priroda*, (6), pp. 3–10. (In Russian).
4. Schurig, D., Pendry, J.B., & Smith, D. R. (2006). Calculation of material properties and ray tracing in transformation media. *Optics Express*, 14(21), pp. 9794–9804. (In English). DOI 10.1364/oe.14.009794.

5. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), pp. 977-980. (In English). DOI 10.1126/science.1133628.
6. Ma, H., Qu, S., Xu, Z., Zhang, J., Chen, B., & Wang, J. (2008). Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks. *Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 77(1), pp. 1-4. (In English). DOI 10.1103/PhysRevA.77.013825.
7. Wang, W., Lin, L., Ma, J., Wang, C., Cui, J., Du, C., & Luo, X. (2008). Electromagnetic Concentrators with Reduced Material Parameters Based on Coordinate Transformation. *Optics Express*, 16(15), pp. 11431-11437. (In English). DOI 10.1364/oe.16.011431.
8. Luo, Y., Zhang, J., Chen, H., & Wu, B.-I. (2008). Full-wave analysis of prolate spheroidal and hyperboloidal cloaks. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(23), 5101. (In English). DOI 10.1088/0022-3727/41/23/235101.
9. Luo Y., Zhang, J., Wu, B.-I., & Chen, H. (2008). Interaction of an electromagnetic wave with a cone-shaped invisibility cloak and polarization rotator. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, (78), 125108. (In English). DOI 10.1103/PhysRevB.78.125108.
10. Kim, S. H., & Das, M. P. (2013). Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials. *Modern Physics Letters B*, 27(20), 1350140. (In English). DOI 10.1142/S0217984913501406.
11. Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., & Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific Reports*, (6(1)), 19238. (In English). DOI 10.1038/srep19238.
12. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2013). Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. *Physical Review Letters*, (112), 133901. (In English). DOI 10.1103/PhysRevLett.112.133901.
13. Brûlé, S., Enoch, S., & Guenneau, S. (2020). Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, (384(1)), 126034. (In English). DOI 10.1016/j.physleta.2019.126034.
14. Walser, R. M. (2000). Metamaterials: What are they? What are they good for? APS March Meeting Abstracts, (1), pp. 5001. (In English).
15. Smith, D. R., Vier, D. C., Kroll, N., & Schultz, S. (2000). Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, (77(14)), pp. 2246-2248. (In English). DOI 10.1063/1.1314884.
16. Walser, R. M. (2001). Electromagnetic metamaterials. *Complex Mediums II: Beyond linear isotropic dielectrics*. International Society for Optics and Photonics, (4467), pp. 1-15. (In English).
17. Strutt, J. W. (2011). On the Remarkable Phenomenon of Crystalline Reflexion described by Prof. Stokes. *Scientific Papers*. Cambridge Library Collection - Mathematics. Cambridge, Publ. Cambridge University Press, pp. 204-212. (In English). DOI 10.1017/cbo9780511703980.010.
18. Mogilevsky, I. E., & Rovenko, V. V. (2014). Mathematical modeling of the cloaking method for problems of radio-locating masking. *Physical Bases of Instrumentation*, (3(4)), pp. 28-39. (In Russian).
19. Ohtaka, K. (1979). Energy band of photons and low-energy photon diffraction. *Physical Review B*, 19(10), pp. 5057-5067. (In English). DOI 10.1103/PhysRevB.19.5057.
20. Sajeev, J. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, (58(23)), pp. 2486-2489. (In English). DOI 10.1103/PhysRevLett.58.2486.
21. Sigalas, M., Kushwaha, M. S., Economou, E. N., Kafesaki, M., Psarobas, I. E., & Steurer, W. (2005). Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, (220(9-10)), pp. 765-809. (In English). DOI 10.1524/zkri.2005.220.9-10.765.
22. Bao, J., Shi, Z., & Xiang, H. (2012). Dynamic responses of a structure with periodic foundations. *Journal of Engineering Mechanics*, (138(7)), pp. 761-769. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000383.
23. Xiang, H. J., Shi, Z. F., Wang, S. J., & Mo, Y. L. (2012). Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*, (21(11)), 112003. (In English). DOI 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
24. Cheng, Z., & Shi, Z. (2013). Novel composite periodic structures with attenuation zones. *Engineering Structures*, (56), pp. 1271-1282. (In English). DOI 10.1016/j.engstruct.2013.07.003.
25. Cheng, Z., Shi, Z., Mo, Y. L., & Xiang, H. (2013). Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps. *Journal of Applied Physics*, (114), 033532. (In English). DOI 10.1063/1.4816052.

26. Huang, J., & Shi, Z. (2013). Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation. *International Journal of Geomechanics*, (13(2)), pp. 132-142. (In English). DOI 10.1061/(asce)jgm.1943-5622.0000193.
27. Yan, Y., Laskar, A., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., Mo, Y. L., & Shi, Z. (2014). Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*, (116(4)). (In English). DOI 10.1063/1.4891837.
28. Yan, Y., Cheng, Z., Menq, F., Mo, Y. L., Tang, Y., & Shi, Z. (2015). Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation. *Smart Materials and Structures*, (24(7)). (In English). DOI 10.1088/0964-1726/24/7/075006.
29. Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, (18(8)), 083041. (In English). DOI 10.1088/1367-2630/18/8/083041.
30. Krödel, S., Thomé, N., & Daraio, C. (2015). Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, (4), pp. 111-117. (In English). DOI 10.1016/j.eml.2015.05.004.
31. Dertimanis, V. K., Antoniadis, I. A., & Chatzi, E. N. (2016). Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers. *Journal of Engineering Mechanics*, (142(9)), pp. 1-10. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001120.
32. Wagner, P.-R., Dertimanis, V. K., Chatzi, E. N., & Beck, J. L. (2018). Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials. *Journal of Engineering Mechanics*, (144(3)), pp. 1-17. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001404.
33. Cacciola, P., & Tombari, A. (2015). Vibrating barrier: A novel device for the passive control of structures under ground motion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, (471), 2179. (In English). DOI 10.1098/rspa.2015.0075.
34. Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A., & Daraio, C. (2016). Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific Reports*, (6(1)), 39356. (In English). DOI 10.1038/srep39356.
35. Haupt, R. W., Liberman, V., Rothschild, M., & Doll, C. G. (2018). Seismic cloaking protection from earthquakes. *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-7. (In English). DOI 10.1109/THS.2018.8574152.
36. Geng, Q., Zhu, S., & Chong, K. P. (2018). Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (107(14)), pp. 264-278. (In English). DOI 10.1016/j.soildyn.2018.01.028.
37. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2017). Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil. *Scientific Reports*, (7(1)), 18066. (In English). DOI 10.1038/s41598-017-17661-y.
38. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2013). Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves? *arXiv*, 1301.7642. (In English). DOI 10.58550/arXiv.1301.7642.
39. Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., & Craster, R. V. (2016). A seismic metamaterial: The resonant metawedge. *Scientific Reports*, (10(6)), 27717. (In English). DOI 10.1038/srep27717.

Сведения об авторе

Митрошин Василий Александрович, старший преподаватель кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), e-mail: mitroshinva@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-4776-5118

Information about the author

Vasilii A. Mitroshin, Senior Lecturer at the Department of Theoretical and Structural Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), e-mail: mitroshinva@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-4776-5118