

- виброускорение (м/с^2) – прямая зависимость вибрации от силы, ее вызвавшей;
- виброскорость (мм/с) – величина, характеризующая перемещение точки измерения вдоль оси электродвигателя;
- виброперемещение (мкм) – величина амплитуды, показывающая расстояние между крайними точками при вибрации.

При измерениях вибрационных характеристик, в большинстве случаев, измеряют виброскорость, так как она наиболее точно описывает характер проблемы [5]. Оценка состояния объекта испытания по пиковому или среднеквадратическому значению виброскорости во всем частотном диапазоне измерений имеет ряд существенных недостатков. То есть, не могут быть учтены вибрационные проявления технологических и режимных отклонений при эксплуатации оборудования. Уровень вибрации обычно определяется в фиксированной полосе частот (для большинства виброметров в полосе от 10 Гц до 1 кГц), что иногда не может обеспечить достаточно высокую степень чувствительности параметра на начальной стадии развития дефекта. И самым большим недостатком оценки состояния оборудования по общему уровню вибрации является то, что он практически нечувствителен к изменениям сравнительно низкоуровневых частотных составляющих (с малыми энергиями в колебательном процессе) вибросигнала, характерных, например, для ряда зарождающихся и развивающихся дефектов подшипников качения, зубчатых передач, электрических и ряда других дефектов [5]. Устранить эти существенные недостатки возможно при помощи вышеупомянутого спектрального анализа. Но его использование увеличивает объем обрабатываемых данных, поэтому необходимо выбирать наиболее оптимальный метод диагностики.

Вибродиагностические методы контроля состояния электрических машин обычно являются первым этапом в оценке их состояния, так как позволяют анализировать состояние оборудования непосредственно во время его работы. После выявления основных характерных признаков существования того или иного дефекта необходимо применять другие, специализированные методы диагностики для более тщательной проверки, а оборудование, имеющее несоответствия по величине вибрационных параметров, не допускается к эксплуатации и подлежит дальнейшей доработке или наладке. Это является важным критерием для оценки надежности и безопасности работы оборудования.

Список литературы

- 1 Кудина, Е. Ф. Влияние виброакустических факторов на экологическую безопасность производства / Е. Ф. Кудина, И. В. Приходько // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : сб. докл. V Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4–5 июня 2020 г. – Гомель : ГГУ им. Ф.Скорины, 2020. – С. 460–468.
- 2 Кудина, Е. Ф. Оценка влияния вибрации на безопасность оборудования и экологию производства / Е. Ф. Кудина, И. В. Приходько, П. А. Курицын // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2–3 июня 2022 г. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 279–281.
- 3 Додолев, С. Г. Диагностирование технических объектов методами неразрушающего контроля : учеб.-метод. пособие / С. Г. Додолев, О. В. Холодилов. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.
- 4 Холодилов, О. В. Методы и средства неразрушающего контроля: лабораторный практикум / О. В. Холодилов, В. В. Бурченков, А.В. Янчилик. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.
- 5 Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Наука, 1996. – 276 с.

УДК 699.844

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

А. В. ЛЕМЕШЕВСКАЯ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Практически все, что окружает нас, звучит: шум ветра, рокотание птиц, гул моторов, а также большую долю информации человек воспринимает слухом. Звук – это механические колебания волн, распространяемых в упругой среде (воздушная и водная оболочки, твердые тела). Стремительно развивающаяся промышленность, инновации в области техники, конструирование тяжелых станков, аппаратов, механизированных приборов – все это в совокупности способствует проявлению шумового фактора на окружающую среду и на человека в том числе [1].

С ростом численности населения и развитием технологий уровень шумового загрязнения продолжает расти, требуя инновационных решений. Традиционные методы борьбы с шумом, такие как звукоизоляция зданий и использование барьеров, не всегда эффективны и могут быть дорогостоящими. Поэтому разработка новых материалов, способных активно или пассивно поглощать и рассеивать звук, является актуальной и приоритетной задачей. Кроме того, важным аспектом является разработка экологически чистых и устойчивых материалов с шумоподавлением, которые не наносят вреда окружающей среде и могут быть переработаны после использования. Целью данного исследования является комплексный анализ существующих и перспективных материалов с шумоподавлением, выявление их основных характеристик, преимуществ и недостатков, а также определение областей их наиболее эффективного применения.

Сейчас средний уровень шума в городах, производимый транспортом, растет из-за увеличения интенсивности движения. Особенно в кварталах, прилегающих к крупным дорогам, – там уровень шума может составлять 67–77 децибел, что сопоставимо с детским плачем [2].

Степень влияния шума на организм человека зависит от некоторых характеристик:

- время воздействия;
- спектральный состав;
- интенсивность;
- характер работы человека;
- положение человека;
- индивидуальные особенности организма [3].

Повреждения слуха из-за воздействия шума имеют особое значение, потому что необратимы. Тенденция распространения в крупных городах тугоухости из-за воздействия шума до сих пор сохраняется. Примерно у 1 миллиарда населения мира (или 16 %) присутствуют серьезные нарушения слуха – исходя из данных Всемирной организации здравоохранения [4].

Метаматериалы. Метаматериалы – это искусственно создаваемые структуры из ячеек малых волновых размеров (метаатомов), которые могут иметь, кроме обычных, также свойства, какие не встречаются в природе. Их активное исследование началось в электродинамике и оптике в 1990-х годах после того, как было сконструировано и экспериментально изучено несколько таких структур, в том числе структура с отрицательной рефракцией. Исследования сильно активизировались с разработкой так называемого метода преобразовательной оптики [5, 6], позволившего получить теоретические решения для задач о «шапке-невидимке», «суперлинзе» и других, ранее считавшихся неразрешимыми. Реализовать эти решения можно только с помощью метаматериалов. Дату опубликования метода, 2006 год, можно считать годом рождения акустических метаматериалов, так как большинство результатов электродинамики и оптики были практически сразу распространены на акустику [7].

В августе 2025 года появились новости о «прорыве» в лаборатории Синь Чжана в Бостонском университете, которые произвели фурор в мире управления звуком. В новом исследовании ученые представили инновационную разработку – фазово-градиентные ультраоткрытые метаматериалы PGUOM, способные эффективно заглушать звуки широкого спектра частот (рисунок 1).

По данным Tech Xplore, новый материал представляет важный этап многолетнего проекта Чжана по созданию эффективного акустического глушителя. Первоначальные разработки фокусировались преимущественно на снижении низкочастотного шума в системах вентиляции и охлаждения. Новую технологию можно применять в гораздо большем спектре ситуаций.

PGUOM эффективно устраняет шумы практически любых частот. Хотя переход от узкополосного подавления к широкополосному немного снижает максимальную эффективность звукоизоляции, данная разработка предлагает большие преимущества для практического использования в промышленности, офисных помещениях и общественных пространствах, где важна качественная циркуляция воздуха одновременно с устранением постороннего шума [8].



Рисунок 1 – Специализированная вентиляционная система PGUOM, демонстрирующая эффективное широкополосное подавление шума, одновременно поддерживая свободный проход воздушного потока с уровнем открытости до 70 % [8]

Метаматериал Чжана состоит из одиночных или повторяющихся суперячеек, каждая из которых включает три элементные ячейки субволнового диапазона. В первой и третьей ячейках установлены плотные барьеры, обеспечивающие управляемое изменение фазы проходящих звуковых волн, тогда как центральная ячейка остается свободной для нормального воздухообмена. Благодаря этому формируется полный 2π -фазовый градиент, превращающий входящий звук в поверхностные волны, аналогичные оптическим плазмонным волнам, которые поглощаются и гасятся поверхностью материала. Результат – широкополосный шум эффективно подавляется, при этом сохраняется воздушный поток и геометрическая адаптивность. Создатели PGUOM нацелены на внедрение собственных инноваций непосредственно в серийные товары и прикладные решения. Пока что они совершенствуют свойства метаматериалов для крупномасштабного промышленного производства. Параллельно ведется работа по улучшению показателей звукопоглощения при сохранении низкого сопротивления движению воздуха и минимальной общей толщины материала [9].

Традиционные материалы для шумоподавления, такие как минеральная вата или пенополистирол, часто обладают значительным экологическим следом из-за энергоемких процессов производства, использования невозобновляемых ресурсов и трудностей в утилизации. Именно поэтому все больше внимания уделяется разработке и применению экологичных материалов, которые не только эффективно поглощают звук, но и оказывают минимальное воздействие на окружающую среду.

Натуральные волокна. Использование натуральных волокон, таких как конопля, джут, лен, кокосовое волокно и шерсть, является одним из направлений в создании экологичных шумопоглощающих материалов. Эти материалы обладают рядом преимуществ: они возобновляемы, биоразлагаемы и имеют низкую энергетическую интенсивность производства. Благодаря своей пористой структуре природные волокна эффективно поглощают звук, особенно в средне- и высокочастотном диапазонах.

Конопля и лен обладают высокой прочностью и упругостью, что делает их отличным выбором для изготовления шумопоглощающих панелей и матов. Их выращивание не требует больших затрат ресурсов и не оказывает негативного влияния на почву.

Джут широко доступен и относительно недорог, что делает его привлекательным вариантом для массового производства шумопоглощающих материалов. Джутовые панели и коврики хорошо поглощают звук и могут использоваться в различных помещениях.

Кокосовое волокно обладает отличными звукоизоляционными свойствами и устойчивостью к влаге, что делает его идеальным для использования во влажных помещениях.

Шерсть – прекрасный природный изолятор, который не только эффективно поглощает звук, но и регулирует влажность в помещении. Шерстяные панели и ковры создают уютную и акустически комфортную атмосферу.

Несмотря на свои преимущества, природные волокна могут быть подвержены воздействию влаги и гниению, поэтому их часто обрабатывают специальными экологически безопасными пропитками для повышения долговечности и устойчивости к биопоражениям [10].

Переработанные материалы. Важным направлением в разработке экологичных материалов для шумоподавления является использование переработанных отходов. Переработка позволяет не только сократить количество отходов, отправляемых на свалки, но и снизить потребление первичных ресурсов. *Отработанная одежда, текстильные отходы и ковры* могут быть переработаны в шумопоглощающие панели и маты (рисунок 2). Эти материалы обладают хорошими акустическими свойствами и могут использоваться в различных помещениях, от офисов до жилых домов [11].

Пластик, переработанный из бытовых отходов или мусора с пластиковой фабрики, превращается в панели с высокой прочностью и хорошими акустическими характеристиками. Они долговечны, влагостойки и подходят для влажных помещений [12].

Амбициозную задачу – разработать технологию строительства полноценного здания из пластиковых пакетов и бутылок поставили перед собой специалисты нового стартапа из Лос-Анджелеса. Суть идеи состоит в том, чтобы создать современный, более быстрый, экологичный и чистый способ возвести дом, чем при условии использования традиционных строительных блоков. Для этого предполагается использовать пластиковые отходы, в том числе те, которые не подлежат вторичной переработке. Разработанная технология BuFusion Global позволяет переработать «неперерабатываемый» пластик в прочные кирпичи большого размера. Шлакоблоки, именуемые «BuBlocks» (рисунок 3), изготавливаются методом парового уплотнения. Достоинство этой технологии состоит в том, что для неё не требуется каких-либо добавок, клеевых составов либо наполнителей [13].



Рисунок 2 – Теплошумоизоляционные плиты Экотеплин 50 мм с антипиреном



Рисунок 3 – Шлакоблоки ByBlocks

Переработанные шины представляют экологичное решение, позволяющее не только утилизировать старый транспортный мусор, но и создавать высокоэффективные звукоизоляционные материалы. Такой материал обладает отличной амортизирующей способностью, что способствует уменьшению передачи вибраций и шумов. Механизм снижения шума основан на физических свойствах резины: способности поглощать и рассеивать вибрационные волны. Такое решение широко используется в строительстве зданий, аэродромных покрытиях, дорожных покрытиях, а также для шумоизоляции промышленных объектов и транспортных средств [14].

Биополимеры. Биополимеры входят в состав живых организмов – белков, нуклеиновых кислот, полисахаридов, лигнина. Это достойная альтернатива искусственным пластикам, которые загрязняют окружающую среду. Их процесс разложения составляет от 400 до 700 лет, а биополимеров – до полугода, при этом не наносится ущерб природе. Биополимеры, полученные из возобновляемых природных ресурсов, таких как крахмал, целлюлоза, хитин и белки, обладают уникальным сочетанием свойств, которые делают их идеальными кандидатами для шумопоглощающих и звукоизоляционных применений. Их структура, пористость и вязкоупругие характеристики могут быть настроены и оптимизированы для поглощения звуковых волн в широком диапазоне частот. Более того, биополимеры биоразлагаемы и компостируемы, что значительно снижает их воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными синтетическими материалами.

Использовать *грибной мицелий* в производстве шумоизолирующих материалов предложили специалисты Немецкого института окружающей среды, безопасности и энергетики имени Фраунгофера. Они обратили внимание на то, что грибница, формируемая из нитевидных гифов, имеет пористую структуру и способна разрастаться до высокой плотности. Другими словами, она может превращаться в сплошной покров со множеством воздушных камер, которые способны поглощать звуковые волны. Однако предложенный немецкими исследователями материал – это не просто пласты мицелия. В основе материала лежат волокна древесины, тщательно просушенная солома, отходы пищевых производств и грибница, выращенная в лабораторных условиях. Из них был изготовлен специальный субстрат, из которого посредством 3D-принтера печатаются своеобразные матрицы, представляющие основу для дальнейшего роста мицелия. Когда он разрастается до необходимой плотности, затвердевшие матрицы отправляются в печи для высокотемпературной обработки. Под воздействием жара мицелий погибает и теряет органическую массу. Это позволяет получить структуру с высокой плотностью открытых пор (рисунок 4), которая, по оценкам разработчиков, как нельзя лучше справляется с задачами шумопоглощения [15].



Рисунок 4 – Шумоизоляционный материал на базе грибного мицелия

Исследование материалов с шумоподавлением является важной и актуальной задачей, решение которой позволит создать более комфортную и безопасную среду для жизни и работы людей.

Перспективы развития экологичных материалов для шумоподавления связаны с дальнейшим совершенствованием технологий производства, расширением ассортимента используемых материалов и повышением их эффективности и долговечности.

Переход к использованию экологичных материалов для шумоподавления является важным шагом на пути к созданию более устойчивой и здоровой окружающей среды.

Список литературы

- 1 Борьба с шумом на производстве : справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.
- 2 Бубнов, И. Н. Влияние транспортного шума на здоровье человека и способы его минимизации / И. Н. Бубнов, О. Р. Ильясов // Инновационный дискурс развития современной науки : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 2 июня 2025 г. – Петрозаводск : Междунар. центр науч. партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2025. – С. 251–257.
- 3 Способы защиты от шума и вибрации железнодорожного подвижного состава / И. И. Балтер, А. М. Березовский, Г. В. Бутаков [и др.] ; под ред. Г. В. Бутакова. – М. : Транспорт, 1978. – 231 с.
- 4 Иванов, Н. И. Концепция снижения шума в РФ / Н. И. Иванов // Защита от повышенного шума и вибрации : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под ред. Н. И. Иванова. – СПб. : Айсинг, 2015. – С.12–25.
- 5 Pendry, J. V. Controlling elec tromagnetic fields // J. V. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith // Science. – 2006. – Vol. 312, № 5781. – P. 1780–1782.
- 6 Leonhardt, U. Optical conforming mapping / U. Leonhardt // Science. – 2006. – V. 312, № 5781. – P. 1777–1780.
- 7 Бобровницкий, Ю. И. Поглощение звука и метаматериалы (обзор) / Ю. И. Бобровницкий, Т. М. Томила // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 5. – С. 517–525. – DOI: 10.1134/S0320791918040020.
- 8 This smarter sound shield blocks more noise without blocking air // Tech Xplore. – URL: <https://techxplore.com/news/2025-08-smarter-shield-blocks-noise-blocking.html> (date of access: 25.09.2025).
- 9 Шум больше не страшен: как новые метаматериалы глушат звук // Hi-Tech Mail. – URL: <https://hi-tech.mail.ru/news/131689-shum-bolshe-ne-strashen-kak-novye-metamaterialy-glushat-zvuk/> (дата обращения: 26.09.2025).
- 10 Экотекстиль и натуральные материалы для шумоизоляции: экологичная альтернатива традиционным средствам // Tecnov.ru. – URL: https://tecnov.ru/ekotekstil-i-naturalnye-materialy-dlya-shumoizolyatsii-ekologichnaya-alternativa-traditsionnym-sredstvam (дата обращения: 27.09.2025).
- 11 Преимущества акустических экранов из шумоизоляционных матов Экотеплин // Экопланета, Натуральные строительные материалы. – URL: <https://www.ekoplaneta.ru/blog/sovety-pokupatelyam/akusticheskie-ekrany-iz-shumoizolyatsionnykh-matov-ekoteplin/> (дата обращения: 27.09.2025).
- 12 Использование акустических панелей из переработанных материалов для экологичной шумоизоляции дома // Tecnov.ru – URL: <https://tecnov.ru/ispolzovanie-akusticheskikh-paneley-iz-pererabotannykh-materialov-dlya-ekologichnoy-shumoizolyatsii-doma> (дата обращения: 28.09.2025).
- 13 В Лос-Анджелесе разработали технологию создания кирпичей из переработанного пластика // Novate.Ru. – URL: <https://novate.ru/blogs/040722/63464/> (дата обращения: 28.09.2025).
- 14 Шумоизоляция с помощью переработанных шин: как резиновая крошка снижает вибрационный шум // Tecnov.ru. – URL: <https://tecnov.ru/shumo-izolyatsiya-s-pomoschyu-pererabotannykh-shin-kak-rezinovaya-kroshka-snizhaet-> (дата обращения: 28.09.2025).
- 15 Создан экологически чистый шумоизоляционный материал на базе грибного мицелия // Pacs.ru. – URL: <https://pacs.ru/blog/tekhnologii/sozdan-ekologicheskii-chistyuy-shumoizolyatsionnyy-material-na-baze-gribnogo-mitseliya/?ysclid=mg4uo5lfg0144708507> (дата обращения: 28.09.2025).

УДК 625.06

МОДИФИКАЦИЯ БИТУМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

М. С. МОРДАС, Н. М. АКУЛИЧ, Е. О. КЛИМЕНКОВ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

В дорожной отрасли Республики Беларусь остро стоит вопрос повышения качества битумов, а также рационального использования отходов промышленного производства. Традиционные технологии производства битумов требуют значительных финансовых затрат. В то же время большое количество промышленных отходов требует экологичной утилизации. Использование отходов в качестве модификаторов битумов позволяет решить обе проблемы: улучшить характеристики дорожного покрытия и решить экологические вопросы.

Преимущества использования отходов:

- 1 Экономическая эффективность. Отходы имеют низкую стоимость по сравнению с традиционными полимерными модификаторами.
- 2 Экологический эффект. Сокращение объемов неиспользуемых промышленных отходов.
- 3 Улучшение характеристик битума: повышение теплостойкости, увеличение эластичности, расширение температурного диапазона применения, улучшение адгезии к минеральным материалам.