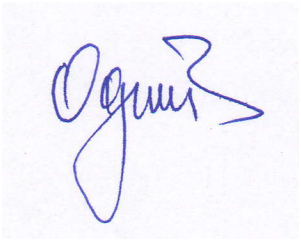
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии

МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

УДК: 528:5-752:534.843:061.5(575.3)

На правах рукописи



ОДИНАЗОДА БОЗОРАЛИ НЕЪМАТ

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ТАДЖИКИСТАНА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.9. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (2.9.1. Охрана труда)

Душанбе - 2026

Диссертация выполнена в институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана и Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими

Научный консультант: **Хакдод Махмадшариф Махмуд,** доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАНТ, главный научный сотрудник отдела «Экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ

Официальные оппоненты:

Каледина Нина Олеговна, доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасности и экологии горного производства», Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Российская Федерация.

Азизов Рустам Очилдиевич, доктор технических наук, профессор, академик ИАТ, заведующий отделом «Научно инновционные технолгии» НАНТ

Амонзода Илхом Темур доктор технических наук, профессор, вице-президент НАНТ

Ведущая организация Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт металлургии» (ГУ «НИИМ») ОАО «Таджикская алюминиевая компания»

Защита диссертации состоится «29» января 2027 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 6D KOA-091 по защите докторских диссертаций при Таджикском техническом университете имени академика М.С.Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10А,

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и на сайте www.ttu.tj

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета к.т.н. _____ Бобоев Х.

Актуальность темы исследования. Промышленное производство сопровождается механическими, тепловыми, оптическими, электромагнитными, химическими, радиационными, пылевыми и другими факторами, которые воздействуют на работающего человека. Одни из них ухудшают условия труда, другие остаются нейтральными или действуют благоприятно. С ростом производственных мощностей и производительности труда интенсивность такого воздействия увеличивается. Поэтому усиление благоприятных и ослабление неблагоприятных факторов производства относится к актуальным задачам организации труда. От их решения зависят и здоровье людей, и устойчивость самого производства.

Шумовыми эффектами сопровождаются почти все природные и производственные процессы. Они имеют вибрационно-акустическую природу. Упругие колебания воздуха воспринимаются органами слуха и влияют на организм человека. Характер этого влияния зависит от частоты и амплитуды колебаний. Умеренные звуки, такие как шелест листвы, журчание родника или звучание музыкального инструмента, вызывают положительные эмоции. Шум урагана, селевого потока, обвала, ударов твёрдых пород и металла, напротив, угнетает человека и вредит его здоровью. По этой причине крупные источники городского шума (автомагистрали, железные дороги, аэродромы, промышленные зоны) отделяют от жилых кварталов зелёными полосами и демпфирующими ограждениями. Особенно высоким шумовым фоном отличаются важные для Таджикистана отрасли, связанные с переработкой твёрдых пород и обработкой металла. Их технологический цикл порождает разнообразные вибрационно-акустические эффекты.

Шумовые эффекты, следовательно, постоянно сопутствуют производственной деятельности, и их исследование имеет научное, практическое и социальное значение.

Установление мира и национального согласия, созидательная политика Лидера нации, Основателя мира и национального согласия, Президента Республики Таджикистан, уважаемого Эмомали Рахмона создали условия, в которых все отрасли национальной экономики получили возможность развиваться. На территории страны возводятся крупные энергетические сооружения, международные автомобильные трассы, объекты промышленного и гражданского строительства, где работают тысячи единиц техники, перерабатывающей твёрдые породы и металл. Только на строительстве Рогунской ГЭС одновременно задействованы сотни таких машин и механизмов. Программа индустриализации страны предполагает дальнейший рост подобных производств. В этих условиях поиск способов ослабить влияние факторов, которые снижают производительность труда и препятствуют созданию комфортной рабочей среды, становится частью общей задачи обеспечения устойчивого эколого-экономического развития национальной экономики.

Между тем, на фоне сложившейся ситуации усиливается необходимость:

– научного исследования совокупности производственных факторов, в первую очередь вибрационно-акустических, влияющих на производительность труда, охрану окружающей среды и условия работы в отраслях экономики;

– разработки научно обоснованных предложений по снижению факторов риска и обеспечению устойчивого развития экономики;

– изучения причин, механизмов возникновения и воздействия вибрационно-акустических шумовых факторов на различных этапах производственного цикла;

– выработки мер по снижению их отрицательного воздействия на производство, здоровье людей и окружающую среду;

– разработки новых материалов и машин с меньшими шумовыми эффектами.

Решение перечисленных задач требует прежде всего детального анализа отраслевой структуры промышленности Таджикистана и её классификации по характеру производства и степени вибрационно-акустического воздействия на производительность труда и здоровье работающих. Необходимо также разобраться, почему возникают эти факторы и как именно они влияют на человека на разных этапах производственного цикла. На этой основе следует разработать научно обоснованные меры, которые позволят снизить их воздействие на условия труда и выпуск продукции на предприятиях Таджикистана. Третья задача — поиск новых материалов и оборудования с пониженными вибрационно-акустическими

характеристиками. Решение всех этих вопросов имеет важное научно-практическое и народнохозяйственное значение и составляет содержание настоящей диссертационной работы.

Степень научной разработанности проблемы. Вопросы охраны труда и защиты от виброакустических факторов исследовались в работах российских учёных Юдина Е.Я. [25], Медведь Р.А. [24], Белова С.В. [17], Бринзы В.Н. [17,28], Заборова В.И. [18], а также таджикских исследователей Курбанова Х.К. [34,36], Хакдодова М.М. [8,26]. Существенный вклад в теорию рассеяния энергии при механических колебаниях внесли зарубежные специалисты Броун С.М. (Brown S.M.) [56], Кауфман Ч.Г. (Kaufman J.G.) [57], а из российских учёных - Писаренко Г.С. [13,33], Головин С.А. [43], Яковлев А.П. [12], Постников В.С. [11] и другие. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов изучали Фавстов Ю.К. [9], Злобинский Б.М. [22], Матвеев В.В [10]., Дриц М.Е. [19], Рохлин Л.Л. [19], Вахобов А.В. [47,48,49], Ганиев И.Н. [47,48,49], Джураев Т. Дж. [47], Хакдодов М.М. [36,37] и ряд других авторов.

Несмотря на большой объём накопленных данных, системная безопасностно-техническая оценка вибрационно-акустических факторов до сих пор разработана лишь фрагментарно. Исследования носят эпизодический характер, а их результаты слабо согласованы между собой. Недостаточно изучены источники, механизмы образования и воздействия этих факторов на здоровье и производительность труда работающих на всех стадиях технологических процессов в условиях промышленных предприятий Республики Таджикистан.

Связь исследования с научной тематикой программ и проектов. Исследование выполнено в русле научной тематики Отдела экологии Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана и направлений работы кафедры безопасности жизнедеятельности и экологии ТТУ имени академика М.С. Осими. По своему направлению оно отвечает задачам «Программы ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 годы», «Стратегии Республики Таджикистан в области науки, технологий и инноваций на период до 2030 года» (утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года, № 263) и «Программы охраны труда в Республике Таджикистан на 2013–2016 годы» (утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 3 декабря 2012 года, № 684).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ:

Цель исследования заключается в разработке и научном обосновании эффективных методов и технических изучение структуры промышленного производства Республики Таджикистан, выявление причин возникновения и механизмов воздействия вибрационно-акустических шумовых факторов на производительность труда и здоровье работников; научно обоснованная классификация отраслей и производственных процессов по степени этого воздействия; разработка и экспериментальная проверка технологических методов, новых материалов и оборудования, которые снижают негативное влияние вибрационно-акустического шума без ущерба для эффективности промышленного производства.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

– анализ структуры промышленности Таджикистана и её классификация по характеру производства и степени влияния шумовых (вибрационно-акустических) эффектов на производственный процесс и окружающую среду;

– изучение законодательно-правовой и нормативной базы Республики Таджикистан в части охраны труда и допустимых уровней шумовых, прежде всего виброакустических, факторов на предприятиях Республики Таджикистан;

– теоретические и экспериментальные исследования механизмов формирования и воздействия виброакустических факторов на организм работающего на различных стадиях технологической обработки материалов;

– моделирование процессов формирования и распространения виброакустических сигналов в типовых узлах промышленных машин; обоснование предложений по снижению их отрицательного влияния и повышению эффективности и комфортности производства;

– оценка виброакустодемпфирующих характеристик применяемых в республике металлических сплавов, композиционных и иных материалов и выбор из них рабочих материалов с меньшим звукоизлучением и более высоким демпфированием;

– изучение механизмов рассеивания энергии колебаний в виброакустодемпфирующих материалах;

– разработка предложений по улучшению условий охраны труда и защиты от виброакустических факторов на промышленных предприятиях с применением виброакустодемпфирующих материалов.

Объект исследования - горно-перерабатывающая и металлообрабатывающая отрасли промышленности Таджикистана.

Предмет исследования - причины возникновения и механизмы воздействия виброакустических факторов на производительность труда, здоровье человека и окружающую среду. В эту же область входит поиск новых материалов, а также разработка технологических методов и конструкций оборудования с пониженными вибрационно-акустическими характеристиками.

Научная новизна исследования:

– предложена классификация отраслей промышленности Республики Таджикистан по степени влияния шума и вибрации на технологию, безопасность и условия труда;

– определены причины появления шума и вибрации ударного происхождения и то, как они действуют на работающих на разных этапах обработки материалов;

– для модернизируемых производств предложены способы снижения шума, учитывающие технологию конкретного предприятия;

– разработана методика расчёта звукового давления рольганга с учётом потерь энергии в роликах из вибродемпфирующих материалов;

– получены зависимости для эквивалентного коэффициента потерь ролика с вибропоглощающим слоем и ожидаемого снижения звукового давления при ударных нагрузках;

– на основе модели соударения деталей машин создана методика определения демпфирующих свойств металлов и сплавов при ударе с учётом их механических свойств, размеров образца и спектра звука;

– обоснован метод свободных изгибных колебаний подвешенного образца с обработкой осциллограммы затухания (скорость затухания звука, рассеяние энергии, третьоктавный спектр, эквивалентный уровень);

– изучены демпфирующие свойства литейных и деформируемых алюминиевых сплавов и многослойных композитов на их основе; алюминиевые сплавы оказались наиболее подходящими для снижения шума;

– рассчитано влияние микродобавок гадолиния и иттербия на уровень звука, скорость его затухания и коэффициент потерь, что позволяет улучшить виброакустодемпфирующие параметры сплава системы Al–Zn–Mg;

– уточнён механизм рассеивания энергии колебаний в виброакустодемпфирующих материалах в зависимости от их физико-механических и технологических свойств;

– разработаны модели совершенствования системы управления охраной труда, в которых оценка виброакустического риска на рабочих местах промышленных предприятий сочетается с применением инженерных средств защиты на основе виброакустодемпфирующих материалов из алюминиевых сплавов.

Теоретическая значимость исследования состоит в системном анализе условий труда и выявлении закономерностей виброакустической обстановки на промышленных предприятиях. В работе раскрыты физические механизмы возникновения виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения и прослежена динамика их проявления на разных стадиях технологии обработки материалов.

Научно-практическая значимость связана с разработкой методики оценки виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения, определением виброакустодемпфирующих свойств различных материалов и установлением связи между их демпфирующими и акустическими характеристиками. Кроме того, предложено устройство для снижения этих факторов. Разработанная методика может использоваться как

в научных исследованиях, так и в учебном процессе вузов, готовящих специалистов в области безопасности жизнедеятельности и экологии.

Положения, выносимые на защиту:

– Разработаны научно-методические основы определения условий труда и оценки воздействя виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий;

– Выявлены механизмы формирования виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения на различных стадиях технологической операции обработки материала;

– Разработаны модель процесса звукоизлучения при соударении деталей машин и методика определения виброакустодемпфирующих свойств различных материалов;

– Выявлены закономерности изменения виброакустодемпфирующих свойств металлических систем в зависимоти от их химического состава, физико-механических и технологических характеристик;

– Разработана модель виброударного взаимодействия элементов рольганга при транспортировке металлопроката, описывающая формирование виброакустических факторов в реальных конструкциях;

– Разработана система управления охраной труда, интегрированная с блоком количественной оценки и управления виброакустическими рисками.

Степень достоверности результатов определяется и подтверждается использованием современного оборудования и стандартизированных методик исследования, а также достаточным объёмом экспериментальных данных, обработанных методами математической статистики.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующими пунктам Паспорта специальностей ВАК при Президенте Республики Таджикистан по специальности 2.9. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (2.9.1. Охрана труда):

– п. 2. Изучение физических, физико–химических, биологических и социально–экономических процессов, определяющих условия труда, установление взаимосвязей с вредными и опасными факторами производственной среды;

– п. 5. Разработка научно обоснованных методов учета, анализа, прогноза и социально-экономических последствий аварийности, производственного травматизма и профессиональной заболеваемости;

– п. 7. Научное обоснование, конструирование и установление области рационального применения и оптимизация параметров, способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов;

– п. 9. Изучение эффективности реализации систем управления и организации охраны труда на предприятиях и по отраслям, разработка информационных систем для сбора оперативной информации по аварийности, травматизму и профессиональной заболеваемости;

– п. 13. Разработка и совершенствование методологии осуществления государственного надзора и общественного контроля за соблюдением требований охраны труда.

Личный вклад соискателя учёной степени состоит в выборе задач исследования и путей их решения, проведении производственных и лабораторных исследований, оценке полученных данных и формулировании основных положений и выводов диссертационной работы, а также в разработке рекомендаций по внедрению научных результатов в практику.

Апробация и реализация результатов диссертации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на научных семинарах и конференциях различного уровня, состоявщихся в 2007 по 2026 годы.

Научные семинары:

– Научные семинары Отдела экологии Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана г. Душанбе;

– Научные семинары кафедры энергоэффективность и ресурсосберегающие технологии Филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в городе Душанбе;

– Научные семинары кафедры безопасность жизнедеятельности и экология Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими г. Душанбе.

Международные научно-практические конференции:

– Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны // Материалы II Международной научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 27–28 ноября 2025 г.);

– Современные задачи машиностроительной промышленности, посвященная 50-летию образования кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» и ускоренной индустриализации Республики Таджикистан // Материалы международной научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 31 октября 2024 г.);

– ГИС в Центральной Азии – GISCA 2017: Геоинформационные науки для устойчивого развития // Материалы международной конференции (Душанбе, 28–30 августа 2017 г.);

– Перспективы развития науки и образования// Материалы VIII Международной научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 3–4 ноября 2016 г.);

– Рациональное использование природных ресурсов и энергосбережение // Материалы VIII Международной научно-практической конференции (Душанбе, Технологический университет Таджикистана, 2015 г.);

– Перспективы развития науки и образования // Материалы IV Международной научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 20–22 мая 2010 г.);

– II Международной научно-практической (Чкаловск [ныне Бустон], Государственный политехнический институт Таджикистана, 2008 г.);

– Перспективы развития науки и образования в XXI веке // Материалы II Международной научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2007 г.).

Республиканские научно-практические конференции:

– Проблема совершенствования конструкции строительно-дорожных машин // Материалы республиканской научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 29–30 апреля 2024 г.);

– Наука и использование энергетического потенциала Таджикистана // Материалы республиканской научно-практической конференции (Курган-Тюбе [ныне Бохтар], Таджикский энергетический институт, 2013 г.);

– Энерго- и ресурсосбережение при использовании природных ресурсов в энергетике и промышленности // Материалы республиканской научно-практической конференции (Курган-Тюбе [ныне Бохтар], Таджикский энергетический институт, 11–12 мая 2012 г.);

– Методы повышения качества и целесообразности процессов производства, посвященная 20-летию независимости Республики Таджикистан и 50-летию МТФ // Материалы республиканской научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2011 г.);

– Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты // Материалы республиканской научно-практической конференции (Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2009 г.).

Реализация результатов диссертации: получены акты внедрения результатов диссертационного исследования со стороны ОАО «Таджикская алюминиевая компания», Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и филиала Национального исследовательского технологического университета МИСИС в городе Душанбе (приложение 1).

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в более 30 научных работах автора общим

объемом 25 печатных листов, из них одна монография; 13 статьей в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики Таджикистан, а также два малых патента Республики Таджикистан на изобретения. (приложение 2).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и 2 приложений. Работа изложена на 362 страницах машинописного текста, включает 67 таблиц и 55 рисунков. Список использованной литературы содержит 301 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введение представлены актуальность проведенных исследований, степень научной разработанности изучаемой проблемы, связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, теоретические основы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, пункты выносимые на защиту, степень достоверности результатов, соответствие диссертации паспорту научной специальности, личный вклад автора, апробация и реализации результатов работы, публикации по теме диссертации, а также структура и объем диссертации.

В первой главе – «Состояние охраны труда и обеспечение безопасных условий труда на рабочих местах промышленных предприятий Таджикистана» анализировано **1.1. Современное состояние промышленности и задачи по улучшения условий охраны труда на производстве.**

Отмечается, что промышленный сектор решает значительную часть социально-экономических задач. В него входят горно-металлургические, химические, машиностроительные, текстильные и другие предприятия, многие из которых обладают высоким экспортным потенциалом. Развитие сектора позволяет удовлетворять растущие потребности внутреннего и внешнего рынков в сырье и готовой продукции.

Стратегическое значение сектора неоднократно подчёркивал Президент Республики Таджикистан Эмомали Рахмон. В Послании Маджлиси Оли от 26 декабря 2018 года ускоренная индустриализация экономики была объявлена четвёртой национальной стратегической целью развития [1]. В Послании от 21 декабря 2021 года 2022–2026 годы были объявлены «Годами промышленного развития» [2].

В развитие этих стратегических задач и положений «Национальной стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года» [3] правительство утвердило соответствующую нормативно-правовую базу. В неё, в частности, входит «Программа ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 годы» (утверждена Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 27 мая 2020 г. № 293) [4]. После принятия этих программ отрасль начала развиваться заметно динамичнее.

Основные показатели развития промышленности Республики Таджикистан за период 2018–2024 представлены в таблице 1.1. [6].

Таблица 1.1. – Основные показатели развития промышленности Республики Таджикистан в 2018–2024 годы

Показатели	**Годы**							**Темпы роста, раз**
	2018	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	
Объем промышленной продукции (в ценах 2024 г.), млн. сомони	25236	28567	31081	37546	41187	44894	53873	2,13
Индекс промышленного производства, %	110,6	113,2	108,8	120,8	109,7	109,0	120,0	108
Количество промышленных предприятий, ед.	2161	2164	2283	2397	2802	3453	3779	1,74
Среднегодовая численность промышленно-производственного персонала (ППП), тыс. чел., всего	85,6	84,2	84,3	85,3	86,3	87,5	92,8	1,08
В том числе рабочих, тыс. чел.	72,1	73,2	67,7	68,3	71,2	72,2	75,9	1,05

В 2018–2024 годах объём продукции увеличился в 2,13 раза - с 25 236 до 53 873 млн сомони. Индекс промышленного производства все эти годы превышал 100%, а в 2024 году достиг 120,0%, что говорит об ускорении роста. Количество предприятий выросло с 2 161 до 3 779, то есть в 1,74 раза. Среднегодовая численность промышленно-производственного персонала увеличилась на 8%, численность рабочих - на 5%.

Основная доля промышленной продукции приходится на предприятии добывающей отрасли, т.е. горнодобывающей отрасли и предприятий металлургического производства и производство готовых металлических изделий, а также машиностроения в перерабатывающей отрасли (таблица 1.2).

Таблица 1.2. – Динамика объема промышленной продукции по основным отраслям промышленности (млн. сомони)

Год	Вся промышленность	Горнорудная промышленность	Металлургическое производство	Машиностроение
2018	24 336,3	4 722,8	2 735,4	225,5
2019	27 586,6	4 845,1	3 930,0	362,0
2020	30 847,3	4 411,5	5 010,4	410,2
2021	38 834,1	8 385,0	6 014,3	425,0
2022	43 034,2	9 082,1	6 122,8	704,5
2023	46 845,9	9 321,4	6 580,2	751,2
2024	53 435,0	13 325,1	8 045,4	884,0

Рост объема промышленности в период 2018-2024 годов связан с увеличением количества промышленных предприятий и численности производственно–технического персонала.

1.2. Охрана труда на производстве и защита от виброакустических факторов

Вопросы охраны труда на производстве и защиты от вредных и опасных виброакустических факторов получили достаточное освещение в научно-технической и учебной литературе.

В условиях ускоренной индустриализации, с расширением масштабов негативного воздействия производственных факторов, проблемы улучшения охраны труда и защиты человека от вредных и опасных виброакустических факторов становятся более острыми.

Охрана труда в Республике Таджикистан имеет конституционную основу и регламентируется трудовым законодательством. Обеспечение конституционного права граждан на безопасный труд относится к основным направлениям государственной социальной политики.

Государственный надзор за охраной труда регламентируется Трудовым кодексом Республики Таджикистан [7]. Правовой фундамент безопасных условий труда образуют и другие профильные законы Республики Таджикистан: «Об охране труда», «О радиационной безопасности», «О пожарной безопасности», «Об обеспечении санитарно-эпидемиологической безопасности населения», «О противодействии вирусу иммунодефицита человека и синдрому приобретённого иммунодефицита (ВИЧ/СПИД)» и «Об охране здоровья граждан».

Для сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, предотвращения производственного травматизма, профессиональных заболеваний и профессиональных рисков Правительство приняло «Программу охраны труда в Республике Таджикистан на 2013–2016 годы» (Постановление Правительства Республики Таджикистан от 3 декабря 2012 года № 684).

Основными задачами Программы являются:

– совершенствование законодательства в области охраны труда и безопасности;

– внедрение новых систем управления охраной труда, обеспечивающих оценку уровней профессиональных рисков, разработка и реализация мероприятий, направленные на минимизацию производственного травматизма

– создание правовых механизмов социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

– создание и формирование механизма переквалификации работников, переподготовки и повышения профессионализма работников по вопросам охраны труда и другие.

Трудовой кодекс Республики Таджикистан (принят Законом от 23 июля 2016 года, № 1329) задаёт основы государственной политики в сфере трудовых отношений. Документ устанавливает государственные гарантии прав граждан и защищает законные интересы работников, работодателей и государства.

В работе отмечается необходимость обеспечении взаимосвязи между управлением охраной труда на национальном уровне и на уровне организации и предприятия. С учетом интеграции в мировую экономику необходимо гармонизировать внутренние стандарты с международными стандартами систем управления охраной труда.

1.3. Оценка виброакустических факторов производственной среды и причины их возникновения

Динамичное развитие промышленности, прежде всего горнорудной и металлургической, повышает актуальность оценки виброакустических факторов (шума, вибрации, инфразвука, ультразвука), которые остаются ведущими причинами профессиональной заболеваемости.

Следует учесть, что «шум, инфразвук, ультразвук и вибрация имеют единую физическую природу: все они являются проявлениями одной механической колебательной системы» [2–А]. Исходя из этого, в работе приведены основные физические и гигиенические характеристики этих факторов, а также их вредное воздействия на организм человека в процессе трудовой деятельности. Обосновано, что детальное изучение физических и гигиенических аспектов воздействия шума, инфразвука, ультразвука и вибрации даёт научную основу для разработки защитных мероприятий, которые снижают уровень профессионального риска персонала на промышленных предприятиях.

1.4. Методы и средства, применяемые для защиты от виброакустичеких факторов

Шум, инфразвук, ультразвук, локальная и общая вибрация как вредные и опасные производственные факторы взаимосвязаны по происхождению, поскольку в основе каждого из них лежат механические колебательные процессы.

В работе отмечено, что снижение шумового воздействия на работающих промышленных предприятий обеспечивается за счет создания шумобезопасного оборудования, использования коллективных средств и методов защиты, применения индивидуальных защитных средств, а также посредством строительно-акустических методов. Показано, что одним из эффективных методов и средств защиты от виброакустических факторов в источнике их возникновения являются применение материалов, обладающих высокими демпфирующими способностями.

Материалы, которые гасят вибрацию и связанный с ней шум, называют виброакустодемпфирующими. Высокие демпфирующие свойства материалов гасят амплитуду колебаний конструкций и снижают уровень шума, который они излучают. В данном случае речь идёт о «препятствование перехода вибрационной энергии в акустическую энергию колебаний окружающей среды. Отмечается, что для создания виброакустодемпфирующих материалов необходимо развивать синтез и исследование высокодемпфирующих сплавов и композиционных материалов на их основе» [13].

1.5. Применение виброакустодемпфирующих материалов для снижения виброакустических факторов на промышленных предприятиях

В разделе анализировано степень применения виброакустодемпфирующих материалов для снижения виброакустических факторов на промышленных предприятиях, описаны различные материалы, обладающие виброакустодемпфирующими свойствами и применяемые в практике для снижения виброакустических факторов производственного оборудования на промышленных предприятиях, а также механизмы рассеивания энергии колебаний в виброакустодепфирующих материалах.

1.5.1. Виброкустодемпфирующие свойства металлов и сплавов

В подраздел дана оценка виброкустодемпфирующих свойств металлов и сплавов. Выявлено, что для конструкционных материалов, работающих в обстановке вибраций и шума, виброакустодемпфирующая способность входит в число определяющих характеристик.

Отмечается, что с развитием современных отраслей промышленности существующие демпфирующие сплавы постепенно теряют способность удовлетворять все более строгим условиям их эксплуатации. В качестве виброакустодемпфирующих материалов обосновано

применение литейных и деформируемы алюминиевых сплавов с различными модифицирующими и легирующими добавками, включая щёлочноземельные и редкоземельные металлы, а также композиционные материалы на их основе [9].

Анализ показал, что при выборе сплавов алюминия особое требование предъявляется не только прочностными характеристиками, но и демпфирующим свойствам. Для сравнения предельной прочности на разрыв и демпфирующих свойств различных металлических демпфирующих сплавов важным является значения предельной прочности на разрыв σ и ψ (удельная демпфирующая способность) некоторых металлов (рисунок 1.1).

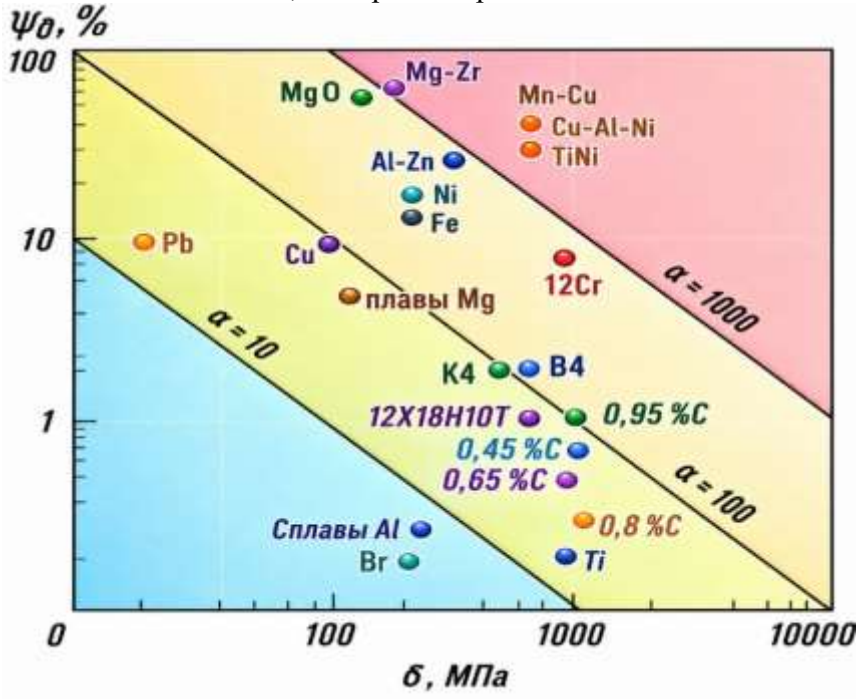


Рисунок 1.1. – Соотношение прочности и демпфирующих характеристик конструкционных металлических материалов с указанием (по данным Сугимото).

Установлено, что, когда удельное значение демпфирования больше 0,1, но меньше 1, этот тип сплава определяется как металл с низким демпфированием. Когда значение удельного демпфирования больше 1, но меньше 10, этот тип сплава характеризуется как металл со средним демпфированием. Когда значение удельного демпфирования больше 10, но меньше 100, этот тип сплава оценивается как металл с высоким демпфированием [10].

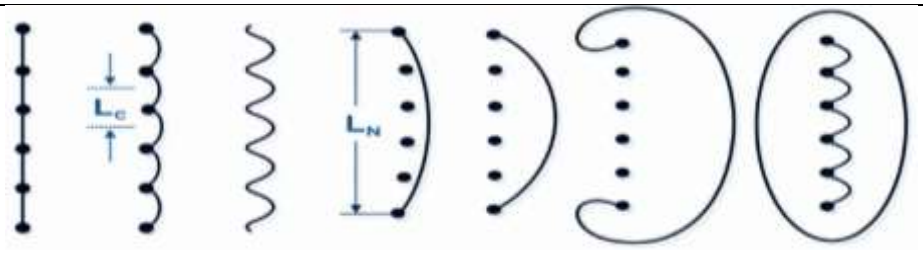
При этом усиливается необходимость изучения демпфирующих и иных эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов при конструировании деталей механизмов, изготавливаемых из этих сплавов, с целью поглощения шумов виброударного происхождения.

1.5.2. Механизмы рассеивания энергии колебаний в виброакусто-демпфирующих материалах

В под раздел уточнены механизмы рассеивания энергии колебаний в виброакустодепфирующих материалах. Отмечается, что «…как материал рассеивает энергию колебаний, зависит и от того, как его нагружают, и от строения сплава; поэтому реальные характеристики получают только из опыта. Для объяснения опытных данных теория внутреннего трения предлагает больше двадцати моделей» [11–15].

В работе выявлено, что измеряемые характеристики виброакустодемпфирующих свойств складываются под влиянием множества факторов, от которых зависит, насколько интенсивно проявляется каждый из механизмов затухания энергии. Так, «зернограничная релаксация опирается на многократно подтверждённый экспериментальный факт: скалывающее напряжение, действующее вдоль границы зерна, границей не удерживается – она откликается на него подобно вязкой среде» [16, 17].

В работе отмечается, что амплитудно-зависимое демпфирование металлов чаще всего трактуют в рамках дислокационной теории Гранато–Люкке–Келлера (ГЛК) (рисунок 1.3), где «…дислокационная линия уподобляется в ней натянутой тяжёлой струне, что делает физику явления простой и наглядной» [20, 21]. При этом, «…дислокациям приписывают шесть механизмов демпфирования; по виду амплитудной, частотной и температурной зависимостей их относят к релаксационным, резонансным либо гистерезисным» [15,16].



где: A–C – процесс движения дислокации между двумя слабыми точками закрепления при увеличении напряжения;

D, E – процесс движения дислокации без закрепления;

F, G – процесс движения дислокации между двумя сильными точками закрепления при увеличении напряжения

Рисунок 1.3. Схематическая диаграмма теоретического режима дислокации ГЛК

Теорией ГКЛ определяет «амплитудно-зависимое демпфирование выражением следующего вида:

$$Q^{-1}(E_0) = Q_1^{-1} + Q_2^{-1}(E_0) + Q_1^{-1}\frac{C_1}{E_0}\exp(-\frac{C_2}{E_0}); \qquad (1.1)$$

где: C_1, C_2 – структурные постоянные, отношение которых $C_1/C_2 \sim p_d L^3 N$ отражает плотность дислокаций p_d, вовлечённых в необратимом отрыве от точечных дефектов;

Q^{-1}_1 и Q^{-1}_2 – соответственно, амплитудно-независимая и амплитудно-зависимая составляющие внутреннего трения.

При «…амплитудах $E_0 \le E_{k1}$ доминирует первая составляющая, в интервале $E_{k1} \le E_0 \le E_{k2}$ – вторая. Величина E_{k2} – критическая амплитуда микропластичности, по достижении которой энергия рассеивается уже при отрыве дислокаций от узлов дислокационной сетки по схеме источников Франка-Рида» [20].

В целом анализ показал, что виброакустодемпфирующая способность материала задаётся его физико-химическим строением и оказывает существенное влияние на механизмы рассеяния колебательной энергии. Последнее свидетельствует о применимости исследуемых материалов на основе литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, модифицируемые щелочноземельными и редкоземельными металлами с заданными физико–химическими и механическими свойствами для защиты от виброакустичеких факторов на производстве.

2. «Теоретический анализ условий труда и процесса формирования виброакустических факторов на различных стадиях технологической операции обработки материала на промышленных предприятиях» в этой главе проведен анализ **2.1. Условий труда и оценка виброакустических факторов на промышленных предприятиях**. Отмечается, что условия труда и виброакустические факторы в промышленности анализировались по статистическим данным о производственном травматизме и профессиональной заболеваемости [3–A].

Анализ изменения количество работников, занятых в неблагоприятных условиях труда показал, что «среди факторов, не отвечающих санитарно-гигиеническим нормам, в структуре неблагоприятных условий труда преобладают повышенные уровни шума и вибрации (таблица 2.1).

Таблица 2.1. – Динамика численности работников, занятых в неблагоприятных условиях труда, чел.

Категория и вредный производственный фактор	2000	2005	2010	2015	2020	2024
Лица, работающие в условиях, не соответствующих санитарно-гигиеническим стандартам, всего	12503	6976	3049	4691	4891	4278
в том числе: – повышенный уровень шума	3 016	2 130	609	1181	1267	1088
– повышенный уровень вибрации	794	470	49	868	702	373
– уровень пыли и газов выше ПДК	8 693	2 568	915	1529	1159	926
Лица, занятые тяжелым физическим трудом	1 285	392	217	723	1602	984
Лица, работающие на оборудовании, не соответствующем требованиям безопасности	985	–	195	242	62	–

Их снижение в динамике объясняется перепрофилированием производства, мероприятиями по улучшению условий труда и профилактикой производственного травматизма» [6–А].

Для улучшения условий труда, снижение производственного травматизма и профессиональных заболеваний в промышленности, «…предусматривается совершенствование государственной статистики по безопасности и охране труда, информации о производственном травматизме, профессиональных заболеваниях и экономических последствиях несчастных случаев на производстве; создание специализированных учреждений для аттестации рабочих мест по условиям труда в промышленности и совершенствование правовой базы и нормативно-технических документов по охране труда» [22].

По данным Службы по государственному надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Правительстве Республики Таджикистан, за первую половину 2025 года в Таджикистане зарегистрированы 25 несчастных случаев на производстве. «В результате несчастных случаев на производстве погибли 18 человек и 20 человек получили травму» [22].

Динамика причин возникновения несчастных случаев и численность работников, занятых во вредных и опасных условиях труда на промышленных предприятиях республики за 2020-2024 годы, приведены в таблице 2.2 [22].

Таблица 2.2. – Численность работников, занятых под воздействием неблагоприятных условий труда в Республике Таджикистан за 2020–2024 гг.

Показатель / фактор неблагоприятных условий труда	2020	2021	2022	2023	2024
Численность работников, занятых в условиях труда, не отвечающих санитарно-гигиеническим нормам, чел.	4891	4588	4501	2252	4278
Занятые тяжелым физическим трудом, чел.	1602	737	1454	649	984
Работающие под воздействием повышенного уровня шума, чел.	1267	1102	1367	634	1088
Работающие под воздействием повышенного уровня вибрации, чел.	702	561	705	485	373
Работающие в условиях повышенной запыленности и загазованности воздуха рабочей зоны (превышающих ПДК), чел.	1159	728	1190	260	926
Работающие на оборудовании, не отвечающем требованиям безопасности, чел.	62	6	16	2	–

Численность работников, подвергающихся повышенному уровню шума, менялась от 1267 чел. в 2020 г. до 1088 чел. в 2024 г., с максимумом 1367 чел. в 2022 г. Численность работающих под повышенной вибрацией снизилась с 702 до 373 чел., хотя в 2022 г. поднималась до 705 чел. Шум и вибрация, таким образом, остаются значимыми неблагоприятными факторами. Это и обосновывает дальнейшее изучение условий труда и разработку мер по снижению виброакустического воздействия на работников промышленных предприятий.

Результаты анализа показывают, что более трети (34,2%) работников промышленных предприятий республики Таджикистана, занятых во вредных условиях труда, регулярно подвергаются воздействию повышенных виброакустических нагрузок. Внедрение эффективной виброзащиты является определяющим фактором снижения рисков профессиональной заболеваемости и повышения производительности труда.

2.2. Основные источники формирования виброакустических факторов ударно–вибрационного происхождения

В работе описаны основные источники формирования виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения на предприятиях различных отраслей промышленности. Так – на предприятиях машиностроения установлено, что основными источниками шума и вибрации на машиностроительных предприятиях являются металлорежущих станки. Шумовой спектр станочного оборудования, как правило, характеризуется максимумом, приходящимся на частотном диапазоне от 500 до 2000 Гц, причем наиболее часто он локализуется в полосе около 1000 Гц. При этом большинство металлорежущих станков надлежащего качества изготовления обладают шумовыми характеристиками, которые отвечают санитарным нормам и не требуют введения

дополнительных мероприятий по снижению шума. На практике, однако, значительная часть станочного парка наших предприятий эксплуатируется давно, и это условие выполняется далеко не всегда.

В работе отмечается, что мощными источниками шума и вибрации на горнорудных предприятиях являются дробилки и мельницы. В дробилке куски руды разной крупности ударно нагружают дробящие органы, а погрешности зацепления привода, дисбаланс и удары о распределительную плиту и воронку добавляют вибрации. Выше 600 Гц преобладает излучение корпуса, кожуха и загрузочного устройства, ниже – шум камеры дробления. Спектры шума дробилок ККД, КСД и КМД приведены в таблице 2.5: при загрузке шум на 8–10 дБ выше, чем в установившемся режиме, а износ бронеплит добавляет 5–6 дБ, так что в худшем случае разница с новой машиной достигает 13–16 дБ.

Определено, что «…шум барабанной мельницы создаётся ударами мелющих тел о футеровку. С ростом частоты он усиливается, но выше 2000–3000 Гц ослабевает из-за локальной пластической деформации поверхностей при ударе; привод даёт составляющие 63–500 Гц. Для приведения шума мельниц к санитарным нормам необходимы технические меры по снижению их виброакустической активности» [16–А, 24].

На предприятиях металлургического комплекса широко используется прокатное и кузнечнопрессовое оборудование, работа которого сопровождается интенсивным импульсным шумом. Уровни акустического воздействия на рабочих местах чаще всего превышают санитарно-гигиенические нормы, что делает это оборудование одним из главных источников производственного шума. Особенно неблагоприятны кузнечнопрессовые машины ударного действия. Кратковременные высокоэнергетические удары порождают импульсный шум, как правило, выше допустимого, что требует применения специальных средств шумоподавления.

В своих работах ученые отмечают, что «…в целях снижения шума в кузнечных цехах целесообразно, когда это допускается технологией, заменять молоты горячештамповочными прессами. Хотя пресс также относится к источникам интенсивного шума, создаваемый им уровень оказывается на 9–10 дБ ниже по всему частотному спектру по сравнению с молотом примерно равной мощности. К тому же шум, сопровождающий работу прессов, оказывает менее выраженное воздействие на физиологические функции организма, чем шум действующих молотов, а потому представляет меньшую опасность для человека» [25].

Выявлено, что наиболее шумными по сравнению с другими металлургическими цехами являются прокатное производство. При производстве блюмов, слябов и заготовок являются соударения сталкивателей со слитком, слитков – с роликами транспортного рольганга, валками обжимной клети и манипуляторами; обрезка слитков ножницами и соударение сталкиваемых обрезанных концов слитка с конвейером; электроприводы роликов рольганга, обжимной клети и другие. Уровнь звукового давления здесь состовляет 66–120 дб. Шум преимущественно низко- и среднечастотный. При прокатке блюмов ударный шум достигает 103 дб.

Анализ показал, что помимо рассмотренных технологических решений, при обработке металлов и других операциях на металлургических предприятиях необходимы методы и средства виброакустической защиты оборудования и рабочих мест. К ним относится автоматизация шумных процессов, позволяющая значительно снизить, а иногда и полностью исключить воздействие шума на рабочих местах. При выборе оборудования следует отдавать предпочтение менее шумным агрегатам, предъявляя изготовителям жёсткие требования по шуму. Не менее важно совершенствование самой технологии обработки. Производство заготовок и крупносортного проката связано с большой протяжённостью объёма металла, неоднородностью пластического течения в очагах деформации и неравномерным распределением температур по сечению. Поэтому сегодня «…процесс улучшения качества металла на прокатном переделе достигается применением оптимальных режимов обжатий, который направлен на варьирование температурно–скоростных факторов, а также и совершенствованием конструкции деформирующих металлических устройств» [26, 27].

2.3. Анализ условий труда и оценка виброакустических факторов на ОАО «ТАЛКО»

Проведенный в работе анализ условий труда в подразделениях ОАО «ТАЛКО» показал, что Наибольшая доля опасных и вредных производственных факторов (46,2 %, почти половина

от общего числа) приходится на электролизное производство, которое в значительной мере определяет состояние безопасности труда на предприятии в целом.

На формирование опасных и вредных факторов оказывает «…влияние выход жидкого металла и шлака в зоны обслуживания, взрывы и выбросы вредных веществ и, как следствие, могут привести не только к значительному экономическому ущербу, но к травмированию работников, обслуживающих оборудование, и загрязнению окружающей среды» [22–А].

На условия труда влияют и факторы производственной среды и трудового процесса: виброакустические (общая вибрация и шум), освещение, микроклимат, электромагнитные поля, химические вещества, тяжесть и напряжённость работы (рисунок 2.3).

Анализ этих факторов показал, что наибольший вклад во вредные условия труда вносят повышенный шум, электромагнитные поля, химические вещества, параметры микроклимата и напряжённость трудового процесса. Обеспечение безопасных условий труда и защита от виброакустических факторов в производстве алюминия осложняются неопределённостью и изменчивостью внутренней и внешней экономической среды, что сказывается на конечных результатах работы предприятия. Для максимальной эффективности производства рисками от опасных и вредных факторов необходимо управлять более точно и минимизировать их воздействие и вероятность экономического и социального ущерба.

Эти задачи на ОАО «ТАЛКО» решает «Служба охраны труда и техники безопасности», действующая на основании устава компании и нормативных правовых актов Республики Таджикистан.

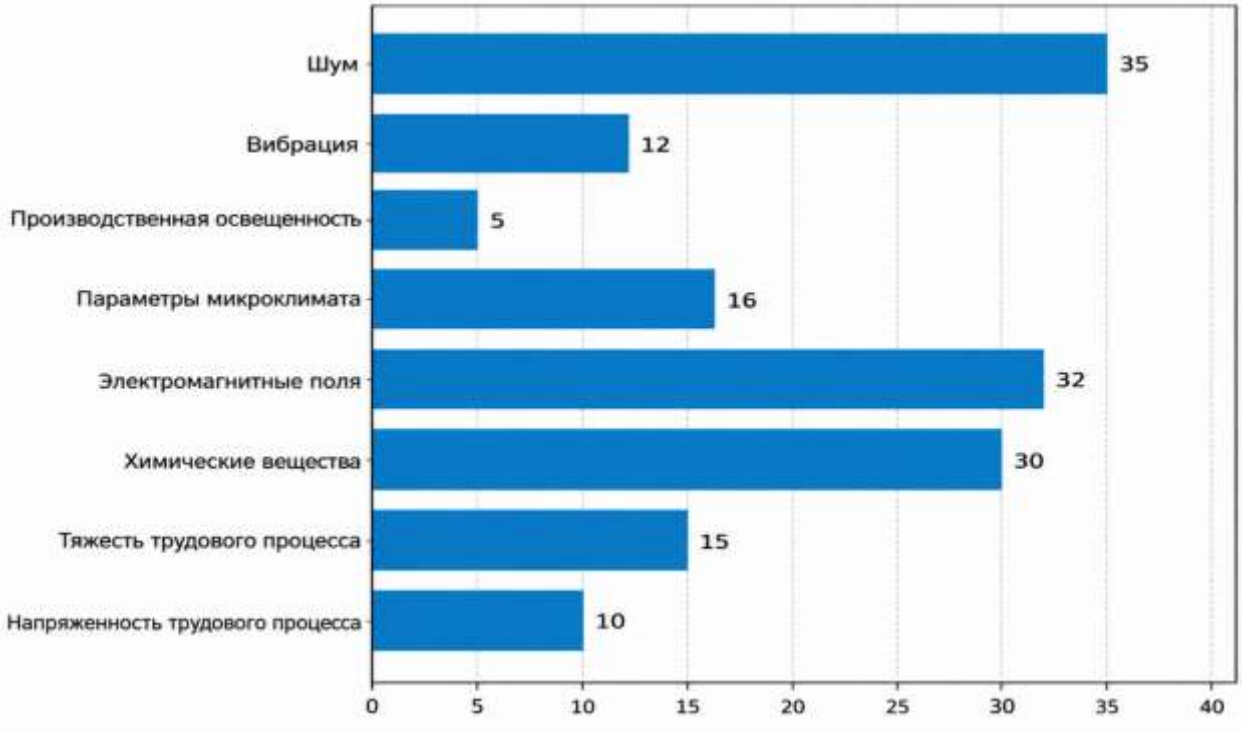


Рисунок 2.3. – Распределения условий труда по факторам производственной среды и трудового процесса на ГУП «Талко», %

2.4. Моделирование процесса формирования виброакустических факторов ударно–вибрационного происхождения при транспортировке сырья и материалов на рольгангах позволяет обосновать возникновение этих факторов в различных механических системах производственного оборудования на промышленных предприятиях.

Рольганги широко применяются в промышленности для автоматизированного перемещения материалов между стадиями технологической обработки. «Шум и вибрацию роликовых конвейеров создают удары и биение транспортируемого материала о ролики, соударения заготовок между собой, узлы трения и качения (подшипники, цепные передачи, элементы привода). Ролики выполняют бесприводными и приводными, с групповым или индивидуальным приводом» [28].

Для того, «…чтобы исключить повреждения поверхности транспортируемого материала или самого ролика от термических деформаций, применяют ролики с бандажами из чугуна либо жаропрочных сталей. Для снижения виброакустических факторов (шума и вибрации) при транспортировке металлических материалов, а также при защите их поверхности от повреждения на поверхности роликов наносят резиновые или полимерные покрытия. Проведенный анализ существующих конструкций роликов рольганга показал, что основные требования для их использования предъявляются к их надежности и долговечности, а также их способности поглощать шум и вибрации роликов, что являются основными целями полезных моделей и изобретений в этой области» [29, 30].

«Известные решения (демпфирующие слои из ниобия или резины с полиамидной тканью) дороги и недолговечны во влажной среде и при контакте с горячим металлом. Нами предложен ролик со стальной бочкой и промежуточным слоем из многокомпонентного алюминиевого сплава (рисунок 2.4), который в сравнительных испытаниях единственный обеспечил снижение шума до санитарной нормы» [4–А, 25].

Для теоретического описния процессов возбуждения виброакустических факторов в рольганговых механизмах используется различные методологические подходы [30,31]. Так как шум рольганга создают в основном удары заготовок о ролики, материал роликов следует выбирать с учётом его демпфирования. Для теоретического описания возбуждения колебаний используют разные подходы в одном из них ролик рассматривают как цилиндрический излучатель соизмеримых длины и диаметра (рисунок 2.5) размер, как в длину, так и в диаметре» [23].

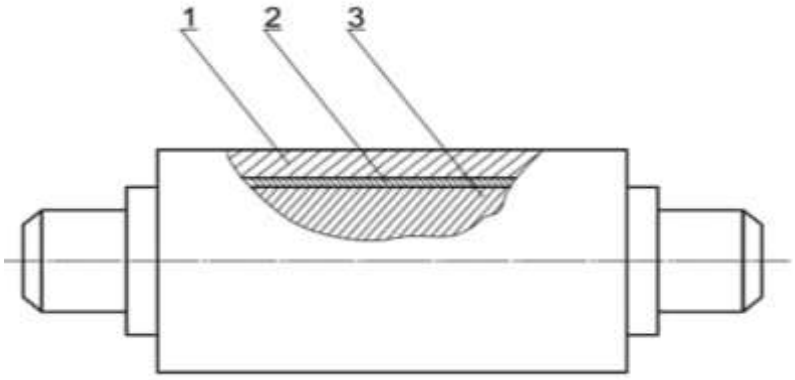


Рисунок 2.4. – Ролик рольганга (1 – наружный часть ролика, 2 – промежуточный слой из вибродемпфирующего материала, 3 – бочка ролика)

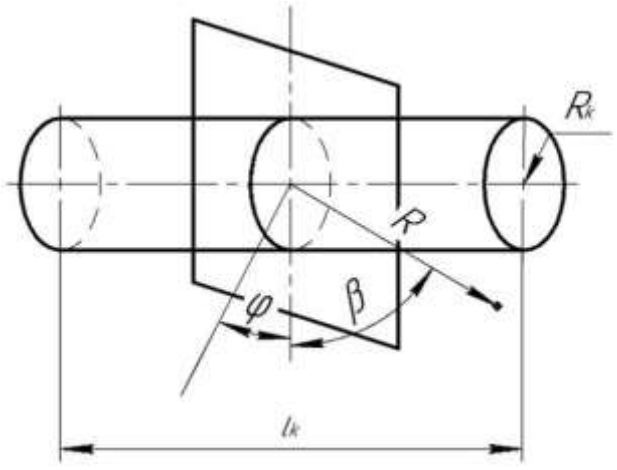


Рисунок 2.5. – Расчетная схема ролика рольганга как цилиндра ограниченной длины

Уровень звукового давления источника шума определяется по известной формуле [38]:

$$L_P = 20lg\frac{P}{2*10^{-5}} \qquad (2.1)$$

Для расчета уровня звукового давления в рольганговых механизмах за исходное выражение принята зависимость звукового давления:

$$P = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\rho_0 c_0}{R}\frac{B(ksin\beta)}{cos\beta H\prime(kR_k cos\beta)} \qquad (2.2)$$

$$B_{m_r}(k_0 sin\beta) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1.5}\int_0^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}(\upsilon(\varphi,x)\exp - i(\varphi + k_0 sin\beta))d\varphi dx \qquad (2.3)$$

где: ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3; c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; k_0 – волновое число, м$^{-1}$; β – угол излучения; β – расстояние от центра источника до расчётной точки, м;

$B(ksin\beta)$ – функция, определяющая амплитудно–фазовое распределение колебательной скорости на поверхности ролика; $\upsilon(\varphi,x)$ – скорость колебания ролика, м/с;

$H'(kR_k cos\beta)$ – функция Ганкеля первого рода; R_k – радиус ролика, м.

С учетом того, что скорость колебания роликов равна υ_k, то функции распределения скорости задается в следующем виде:

$$\upsilon\,(\varphi,x)=\begin{cases}\upsilon_k\ \ cxpi\varphi & \text{при } x\le|l_k|\\ 0 & \text{при } |l_k|>x\end{cases} \qquad (2.4)$$

где l_k – длина ролика, м.

Поставляя зависимости (2.4) в выражение (2.3) получим выражение $B(ksin\beta)$ в виде:

$$B_k=\frac{\upsilon_k l_k}{\sqrt{2\pi}}\ \Phi\,(\beta),\qquad \Phi(\beta)=\frac{sin^{\frac{kl_k}{2}}sin\beta}{0.5kl_k sin\beta} \qquad (2.5)$$

Для расчета звукового давления с учетом производной функции Ганкеля были получены следующие соотношения:

$$kR_k cos\beta\le 1 \text{ и } kR_k cos\beta\ >1.$$

$$\frac{2\pi f_k}{c_0}\ R_k\ cos\beta=0.018R_k\ cos\beta\le 1 \qquad (2.6)$$

Из зависимости (2.1) модуль звукового давления принимает вид:

$$|P_1|=\ \frac{3.5\times10^{-2}(f_kR_k)^2\upsilon_k l_k}{R} \qquad (2.7)$$

где, l_k – собственные частоты колебаний валка, Гц.

С учетом соотношения $0{,}018f_kR_k\cos\beta\ >1$ модуль звукового давления представлена следующей формулой:

$$|P_2|=\ \frac{22\,(f_kR_k)^{0.5}\upsilon_k l_k}{R} \qquad (2.8)$$

Отсюда, с учетом формулы (2.1) получаем:

$$L_{P1}=\ 20\lg\frac{3\times10^{-2}(f_kR_k)^2\upsilon_k l_k}{2\times10^{-5}}=40\lg f_kR_k+20\lg\frac{l_k\upsilon_k}{R}+64 \qquad (2.9)$$

$$L_{P2}=\ 20\lg\frac{22\upsilon_k l_k(f_kR_k)^{0.5}}{2\times10^{-5}R}=20\lg f_kR_k+20\lg\frac{l_k\upsilon_k}{R}+10\lg f_kR_k+121 \qquad (2.10)$$

Если представить ролик рольганга двухопорным стальным цилиндрическим стержнем, его собственную частоту колебаний можно записать так:

$$f_k=4\times10^3R_k\left(\frac{k}{l}\right)^2 \qquad (2.11)$$

Для длинных заготовок звуковая энергия излучается несколькими роликами, количество которых задается как $\mathrm{k_B}=\frac{\mathrm{l_з}}{\mathrm{h_в}}$,

где $\mathrm{l_з}$ – длина заготовки, м; $\mathrm{h_в}$ – шаг расположения роликов, м.

Уровень звукового давления для всей конструкции тогда выглядит следующим образом:

$$L_{P\Sigma}=\ L_P+10\lg\frac{l_з}{h_в} \qquad (2.12)$$

В работе «звуковое давление, создаваемое рольганговым механизмом, определяется с учётом рамы как системы стержневых элементов, а также подшипниковых узлов и цепной передачи» [7-А, 13-А, 23]. По методологии получены следующие расчётные зависимости:

$$P=2{,}3*10^3\frac{khR\upsilon_k}{r};\ L_p=20lg\frac{khR\upsilon_k}{r}+147 \qquad (2.13)$$

где h – толщина звёздочки, м; R – радиус делительной окружности, м; k – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний; υ_k – скорость колебаний на собственных частотах, м/с; r – расстояние от центра звёздочки до расчётной точки, м.

Отсюда, по данным [35, 36], звуковое давление и его уровень рассчитывают так:

$$P=15a\upsilon_k\sqrt{\frac{f_k}{r}};\ L_p=20lga\upsilon_k+10lg\frac{f_k}{r}+118 \qquad (2.14)$$

где, а – размер поперечного сечения, м.

Для элементов из металлического проката зависимость (2.14) приобретает вид:

$$L_p=20lga\upsilon_k\frac{k}{l}+5lg\frac{J}{F}-10lgr+157 \qquad (2.15)$$

где: J – момент инерции ($м^4$) и F – площадь поперечного сечения ($м^2$).

В работе отмечается, что демпфирующая способность материала, характеризуется коэффициентом относительного рассеяния энергии ψ, определяемым как отношение энергии ΔW, рассеиваемой в необратимой форме единицей объема материала за один цикл деформирования, к максимальной удельной потенциальной энергии деформации W, накопленной к моменту достижения пикового напряжения в данном цикле:

$$\psi=\frac{\Delta W}{W} \qquad (2.16)$$

где ΔW – энергия, рассеиваемая единицей объема материала за цикл нагружения, Дж/м³; W – максимальная потенциальная энергия упругой деформации единицы объема за цикл, Дж/м³.

Для определения относительного рассеяния энергии в материале необходимо учитывать характеристику затухания собственных колебаний системы. С этой целью фиксируют виброграмму затухающего процесса, описываемую монотонно убывающей функцией времени $a = f(t)$.

Поскольку полная энергия колебаний механической системы пропорциональна квадрату ее амплитуды перемещения $W \sim a^2$, уменьшение амплитуды за период отражает интенсивность диссипации энергии определяется:

$$W = C\frac{a^2(t)}{2} \qquad (2.17)$$

где, С – жесткость системы, Н/м.

Тогда дифференциал снижения энергии системы за промежуток времени dt равен dW, а коэффициент относительного рассеяния энергии в материале ψ за один цикл колебаний определяется выражением:

$$\psi = -\frac{dW}{W} = -\frac{d(a^2)}{a^2} = -\frac{2\,da}{a} \qquad (2.18)$$

При интегрировании данного соотношения на интервале одного периода колебаний T коэффициент относительного рассеяния энергии принимают равным:

$$\psi \approx 2 \cdot \delta = 2\ln\left(\frac{a_k}{a_{k+1}}\right) \qquad (2.19)$$

где a_k и a_{k+1} – последовательные амплитуды колебаний, разделенные периодом T, м (или м/с²);

$\delta = \ln\left(\frac{a_k}{a_{k+1}}\right)$ – логарифмический декремент затухания колебаний (2.20).

Коэффициент потерь связан с логарифмическим декрементом:

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi}\ln\frac{a_k}{a_{k+1}} \qquad (2.21)$$

Учитывая, что диссипативные потери в системе пропорциональны колебательной скорости поверхности, снижения уровня звукового давления ΔL в окружающей среде при нанесении вибродемпфирующего слоя определяют по формуле:

$$\Delta L = 10\lg\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right) = 20\lg\left(\frac{v_1}{v_2}\right), \text{ дБ} \qquad (2.22)$$

где v_1, η_1 – соответственно амплитуда колебательной скорости (м/с) и коэффициент потерь вибрирующей поверхности до нанесения демпфирующего слоя; v_2, η_2 – то же, после нанесения вибродемпфирующего слоя.

С учетом исследования, снижение уровня звукового давления ΔL при нанесении одностороннего вибропоглощающего слоя на металлическую конструкцию описывается выражением:

$$\Delta L = 10\lg\left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_1}\right), \text{ дБ} \qquad (2.23)$$

Эквивалентный коэффициент потерь двухслойной пластины (конструкции с демпфирующим покрытием) определяется зависимостью [275]:

$$\eta_{\text{экв}} = \eta_1 + \beta \cdot \eta_2 \qquad (2.24)$$

где параметр эффективной жесткости и толщины демпфирующего слоя β выражается соотношением:

$$\beta = 3 \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{h_2}{h_1}\left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)^2 \qquad (2.25)$$

где, η_1, η_2 – коэффициенты потерь материалов несущей металлоконструкции и вибропоглощающего слоя соответственно; E_1, E_2 – модули упругости первого рода материала конструкции и демпфирующего покрытия, Па; h_1, h_2 – толщина несущей металлической стенки (пластины) и вибропоглощающего покрытия, соответственно, м.

Увеличение толщины вибропоглощающего покрытия более чем в 3–5 раз по сравнению с толщиной демпфируемой металлоконструкции нецелесообразно (обычно соотношение толщин принимают в пределах $h_2/h_1 \approx 1{,}5 \ldots 3{,}0$).

Эффективность вибродемпфирующих материалов, помимо коэффициента потерь η, определяется модулем потерь E'', представляющим собой произведение модуля упругости на коэффициент потерь ($E'' = E \cdot \eta$). Чем выше значение этих параметров материала, тем эффективнее его применение в качестве вибропоглощающего покрытия.

Таким образом, приведённые зависимости позволяют рассчитать эквивалентный коэффициент потерь и снижение уровня звукового давления в конструкции ролика рольганга с учётом параметров вибропоглощающего слоя.

3. «Моделирование процесса звукоизлучения при соударение деталей машин и научное обоснование методов оценки виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов» рассмотрены следующие вопросы:

3.1. Выбора материалов для оценки виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов

Для снижения вредного воздействия шума и вибрации сегодня применяют демпфирующие материалы разных типов: сплавы с высокой демпфирующей способностью, вибропоглощающие покрытия, композиционные материалы. Они ослабляют механические колебания, снижают структурный шум и повышают виброакустическую устойчивость конструкций. На основе «…проведенных экспериментальных и теоретических исследований фазового состава, физико–химических, механических, технологических свойств и особенностей взаимодействия компонентов деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–РЗМ и литейных алюминиевых сплавов системы Al–Si и Al–Si–Sr (ШЗМ) были определены акустодемпфирующие свойства этих сплавов в качестве материалов для снижения механического шума и вибрации на рабочих местах металлургического производства» [52].

Литейные алюминиевые сплавы системы Al–Si и Al–Si–Sr, основные характеристики которых представлены в таблице 3.1, известны как силумины, обладающие хорошей технологичностью, достаточно высоким уровнем физико-механических свойств и коррозионной стойкостью, широко применяются в различных отраслях промышленности.

Таблица 3.1. Химический состав и механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Содержание компонентов, масс. %				**Механические свойства**		
Si	Mg	Sb, Ba, Sr	Al	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
6 9	0,1 0,3	0,005Sb 0,1Sb	ост. –	218 216	7,0 5,6	79 77
6 9	0,1 0,3	0,005Ba 0,1Ba	– –	196 202	7,4 8,0	74 75
6 9	0,1 0,3	0,005Sr 0,1Sr	– –	206 212	13,0 12,0	56 58
9 12	0,25 0,25	– –	– –	160 170	3,2 2,4	56 48

В работе указано, что «…легирующие элементы по-разному влияют на дисперсность зерна, фазовый состав и физико-механические свойства матрицы. Это и открывает возможность разработки новых высокодемпфирующих сплавов с заданными виброакустическими характеристиками» [33]. Основные характеристики деформируемых алюминиевых сплавов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Химический состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Содержание компонентов, масс. %				**Механические свойства**		
Zn	Mg	Gd, Yb	Al	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
4 8	1 3	0,005Gd 0,1Gd	ост. –	580 620	6,0 5,5	79 77
4 8	1 3	0,005Yb 0,1Yb	– –	600 630	5,4 6,2	74 75
4 8	1 3	– –	– –	550 600	4,2 6,8	56 58

В работе в качестве многослойных композиционных материалов были использованы многослойные композиты (низкоуглеродистая сталь, плакированная деформируемым алюминиевым сплавом) получали прокаткой на двухвалковом стане 300 (таблица 3.3). Механические испытания проводили на машине Instron ТТ-ДМ по ГОСТ 1497–73, по пять образцов каждого состава, со статистической обработкой результатов.

Таблица 3.3. Механические свойства исследуемых композиционных материалов

Номер образца	**Многослойный композиционный материал**	**σ, МПа**	**δ, %**
1	Сталь 08пс– Сплав Al–Zn–Mg – сталь 08пс	675	5,8
2	Сплав Al–Zn–Mg –сталь 08пс – Сплав Al–Zn–Mg	595	6,2
3	Сталь 08пс	385	3,6
4	Сплав Al–Zn–Mg	550	5,6

Состав контролировали атомно-абсорбционным, нейтронно-активационным, химико-спектральным и масс-спектрометрическим методами. Для гомогенизации сплавы отжигали 200–250 ч при 400–450 °С в запаянных кварцевых ампулах; структуру изучали на микроскопе «Неофот-21», фазовый состав – на дифрактометре «Дрон-3».

3.2. Некоторые представления о теории звукоизлучения металлов и сплавов

В втором раделе рассмотрены ударный метод возбуждения колебаний и процесс соударения, представляющий собой одну из главных причин возникновения механического шума ударно-вибрационного происхождения.

В работе установлено, что в «основу звукоизлучения металлов положен процесс соударения, представляющий собой одну из главных причин возникновения механического шума ударно-вибрационного происхождения. Ударные шумы классифицируют в зависимости от принятой модели генерации шума, в качестве которой может рассматриваться соударение шариков между собой, со стойками либо с пластинами. Последний вариант приобретает особую значимость с технической точки зрения, и именно поэтому звукоизлучение, сопровождающее соударение шарика с пластиной, положено в основу одного из методов определения акустических характеристик металлических материалов» [23]. Чем больше внутреннее трение материала, тем быстрее в нём затухает звук. В работе [34] скорость продольных волн выражена через модуль упругости, плотность и параметры демпфирования:

$$\upsilon_{з.в} = 99.05\sqrt{\frac{E_o}{\rho}\cdot\frac{1-\mu}{(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}} = C\cdot\sqrt{E_o}; \qquad (3.1)$$

где: ρ – плотность, кг/м3; μ – коэффициент Пуассона.

Имеется и другое соотношение [1–А], связывающие внутреннее трение в металле с характеристиками его звукоизлучения при колебаниях:

$$Q_n^{-1} = \frac{7.78\sqrt{m_n\sigma_o(1-\mu^2)R_ш}}{[dn\sqrt{m_ш}+1.59K_2(m_n\cdot V_o)K_1\sqrt{\sigma_o R_ш}][(\frac{m}{a})^2+(\frac{n}{b})^2]\sqrt{Eh^3}}; \qquad (3.2)$$

где: d_n – скорость затухания звуковых колебаний пластины, дБ/с; E – модуль нормальной упругости; μ – коэффициент Пуансона; h – толщина пластины, м; a, b – линейные размеры пластины, м; *m, n* –1,2,3 – целочисленные значения, определяющие количество полуволн, укладывающихся в пластине; *Д =Eh3/12(1–μ)* – цилиндрическая жесткость пластины при изгибе.

Таким образом, по звуку, который металл издаёт после удара, можно достаточно надёжно судить о его демпфировании. Но сравнивать материалы можно только тогда, когда у образцов одинаковы форма (пластина, диск, стержень), крепление и исходная структура.

3.3. Основные экспериментальные методы определения виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов

В работе для обоснования выбора методики исследования виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов рассмотрены различные экспериментальные методы. Показателей демпфирования много, и каждый связан со своим методом измерения. Абсолютные они или относительные, все говорят об одном – сколько энергии материал потерял за цикл деформации из-за неупругости.

В работе отмечается, что демпфирующая способность металлов и сплавов характеризуется коэффициентом относительного рассеяния энергии ψ, который равен отношению энергии W, необратимо рассеянной единицей объёма материала за один цикл нагружения при заданной амплитуде напряжения, к удельной потенциальной энергии деформации W, накопленной в момент максимального напряжения в этом цикле::

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \qquad (3.3)$$

В работе выявлено, что наиболее распространенным по сравнению со всеми другими (прямыми и косвенными) способами определения демпфирующих свойств является метод свободно – затухающих колебаний [12–А]. Демпфирующую способность характеризуют логарифмическим декрементом колебаний δd или относительным рассеянием энергии φ, вычисляемыми по скорости уменьшения амплитуды. Логарифмический декремент колебания рассчитывается по формулам:

$$\delta_{Д} = \frac{\ln A_0}{A_1}; \qquad (3.4)$$

$$\delta_{Д} = \frac{1}{n\ln(\frac{A_0}{A_n})} = \frac{1}{n\ln t}; \qquad (3.5)$$

где: A_0 и A_1 – амплитуды в начале и в конце цикла колебаний; A_n – амплитуда колебаний в конце интервала, состоящего из n – циклов; A_0/A_n=t различные исследователи применяют от 4 до 1,1.

Если расчёты по уравнениям (3.4) и (3.5) совпадают, интенсивность затухания не зависит от абсолютной амплитуды в выбранном интервале, то есть демпфирование системы линейно. Относительное рассеяние энергии и логарифмический декремент связаны простым соотношением:

$$\varphi = 2\delta_{Д} \qquad (3.6)$$

Анализ показал, что чаще всего используется уравнение (3.5), а значение уменьшения колебаний от износа до средней амплитуды получают в выбранном участке осциллограммы:

$$A_{ср.} = \frac{A_0 + A_n}{2}; \qquad (3.7)$$

В случае большого затухания использование равенств (3.5) и (3.7) может нарушить соотношения (3.6) [24–А]. В таких случаях прибегают к дифференциальному определению относительного рассеяния энергии и декремента колебаний.

На основании равенства (3.5) при $A_n \to A_o$ и $t \to N$ получается уравнение для декремента колебаний, соответствующего амплитуде A_1:

$$\delta_{Д}(A) = -d\ln(\frac{A}{d_N}) = \frac{1}{A}\cdot\frac{dA}{d_N}; \qquad (3.8)$$

Из выражения (3.8) следует простое равенство для определения декремента по огибающей затухающих колебаний:

$$\delta_{Д}(A) = -\frac{1}{A}\cdot tgd = \frac{1}{\overline{N}}; \qquad (3.9)$$

где $\overline{N}$ – число циклов (как целое, так и дробное) на участке под касательной, проведенной к огибающей в точке рассматриваемой амплитуды колебаний А.

Уравнение (3.9) позволяет определить достоверные значения декремента колебаний не только при большом, но и при малом затухании.

3.4. Моделирования процесса звукоизлучения при соударении деталей машин разработана методика исследования виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов. В работе на основание представлении о звукоизлучение металлов и сплавов и анализа экспериментальных методов определения виброакустодемпфирующих свойств материалов путем моделирования процесса звукоизлучения при соударинии деталей машин разработана методика исследования виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов.

«Моделирование источников шума опирается на теорию подобия: закономерности, найденные на модели, переносятся на целый класс реальных объектов. Для этого модель должна быть подобна натуре геометрически и акустически» [7–А]:

а) Геометрическое подобие – линейные размеры модели и натуры отличаются в одно и то же число раз:

$$Д_н/Д_м = id \in m \qquad (3.\ 10)$$

Где: Dн – соответствующий линейный размер натурного объекта; Dм – соответствующий линейный размер модели; id – масштабный коэффициент линейного подобия

б) Акустическое (волновое) подобие — равенство отношений характерных линейных размеров к длинам акустических волн в натурных и модельных условиях:

$$L_н/\lambda_м = L_м/\lambda_н \qquad (3.11)$$

где: $L_н$, $L_м$ – линейный размер натуры и модели соответственно; $\lambda_м$, $\lambda_н$ – длина звуковой волны в натуре и модели соответственно.

Поскольку $\lambda_н = C_н / f_н$, $\lambda_м = C_м / f_м$, где $C_н$ и $C_м$ скорость звука в материале, что в натуре и модели, соответственно, то

$$L_н f_н / C_н = L_м f_м / C_м \qquad (3.12)$$

в) Импедансное подобие – безразмерные акустические импедансы модели и натуры совпадают на подобных частотах, найденных по (3.12). Безразмерный импеданс $\boldsymbol{Z_б}$ при этом одинаков:

$$Z_м = Z_н \; при \; f_м = (L_м \cdot C_м / L_н \cdot C_н) f_н \qquad (3.13)$$

При разработке мероприятий по снижению шума «…виброакустического воздействия чаще всего моделируют процессы распространения звуковой энергии (акустику помещений, характеристики звукопоглощающих облицовок, глушителей шума и звукоизолирующих ограждений), а также параметры функционирования источников звука аэродинамического, гидродинамического, механического и электромагнитного происхождения» [4–А, 13–А].

Если все эти условия выполнены, общие и октавные уровни звукового давления в соответствующих точках модели и натуры одинаковы:

$$\boldsymbol{L_м = L_н}, \text{ дБ}$$

если и расстояния до точек измерения уменьшены в том же масштабе $\boldsymbol{r_н / r_м = K_L}$:

$$R_м / R_н = Д_м / Д_н \qquad (3.14)$$

Граница подобных частотных полос модели и натуре связаны так:

$$f_{н1}/f_{м1} = f_{н2}/f_{м2} = Д_м/Д_н \qquad (3.15)$$

Таким образом, звуковая вибрация в теле конечных размеров представляет собой сложную комбинацию волн различных типов, вследствие чего отыскание решения задачи изоляции и поглощения механических колебаний в наиболее общей постановке оказывается весьма затруднительным. Отдельные объекты, к которым относятся, например, машины, оказываются «компактными» на низких частотах, поскольку их размеры, как правило, существенно меньше длины волн звуковой вибрации. Подобные объекты обычно трактуют как абсолютно жесткие массы или как безмассовые пружины, что в ряде случаев позволяет обойтись без решения задачи в волновой постановке. Систему с сосредоточенными параметрами допустимо рассматривать не только как предельный случай суперпозиции множества волн, но и, напротив, описывать волновые процессы в сложных телах как результат взаимодействия многочисленных масс и пружин.

В работе в качестве базовой экспериментальной модели в настоящей работе принята пластина фиксированных размеров, подвешенная вертикально на мягком подвесе из вольфрамовых нитей диаметром около 20 мкм. Свободные изгибные колебания возбуждаются центральным ударом стального шарика диаметром 10 мм и массой 4,5 г [30–А]. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 3.1.

Плоскость подвески образца наклонена к горизонтальной плоскости под разными углами при помощи устройства 5, чтобы избежать повторные соударения. Ударный элемент в виде стального шарика 10 (сталь ШХ15, диаметр 10 мм, массой 4,5 г), из бункера 14 попадает в трубчатую печь 13, подогревается и притягивается сердечником верхнего электромагнита 11.

При его отключении попадает в нижний электромагнит 11, после отключения которого свободно падает на подвешенный плоский образец 8 и генерирует в нем колебания за счет перехода потенциальной энергии к кинематической. Шари 10, отскочившие от образца 8 собираются в приемнике 7.

Для исследования температурной зависимости акустодемпфирующих свойств металлических материалов образец 8 нагревается в зависимости от условия эксперимента нагревательными элементами 9.

Установка ТТУ–2 проще аналогов, «крепление не создаёт в образце лишних напряжений, а положение образца легко менять: шлицевое соединение поворачивает его относительно плоскости подвеса ступенями по 2°, так что можно снимать акустику при разных углах удара» [26–А].

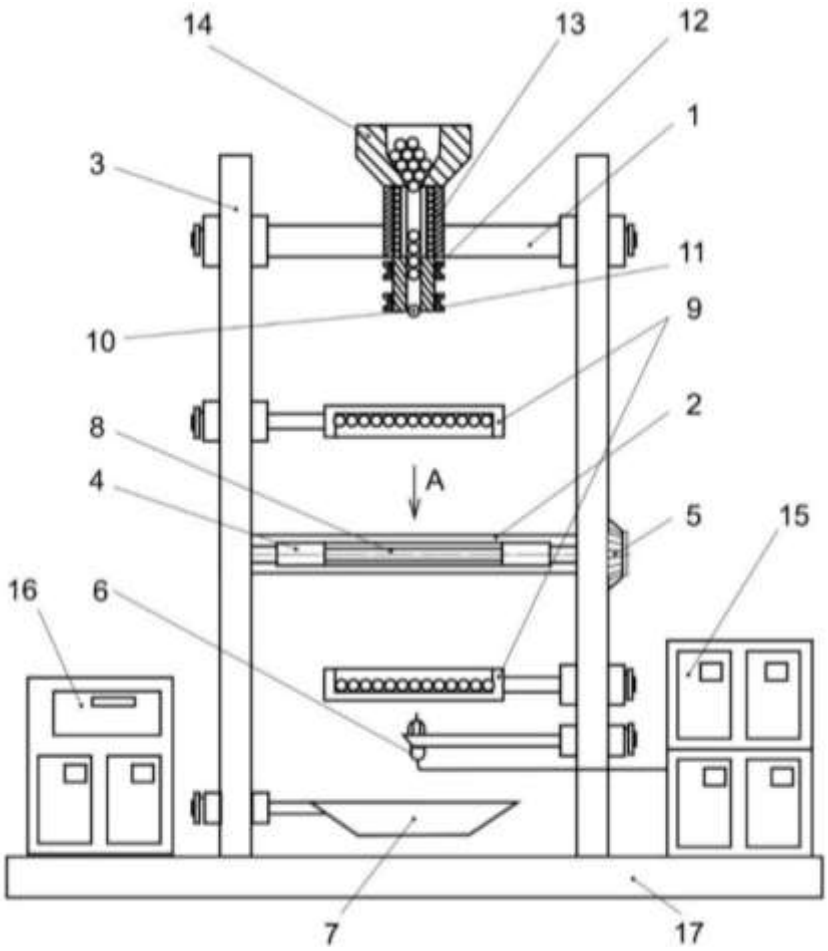


Рисунок 3.1. – Схема установки ТТУ–2
(1– подвижная плита; 2 – неподвижная плита; 3– стойки; 4 – регулируемая плита; 5 – щлицевое соединение; 6 – микрофон; 7– ловитель (приемник) шаров; 8 – образец; 9 – нагревательный элемент; 10 –шарик; 11 – электромагниты; 12 – вольфрамовая нить; 13 – трубчатый нагревательный элемент; 14 – бункер; 15 – панель акустических приборов; 16 – измеритель температуры; 17 – плита основание)

При температурных испытаниях образец 8 нагревают до нужной температуры элементами 9; при необходимости шарики также нагревают в трубчатой печи 13. Когда образец достигает заданной температуры, нагреватели 9 отключают и отводят из зоны испытания. Нагретые шарики из печи 13 падают на электромагнит 12 при отключённом электромагните 11. Затем включают электромагнит 11 и отключают электромагнит 12, после чего шарик притягивается к нижней части сердечника электромагнита 11. При отключении электромагнита 11 (электромагнит 12 работает) шарик 10 падает на образец 8 и после отскока попадает в приёмник 7. Звук, излучаемый образцом 8, регистрирует измерительный микрофон 6, сигнал поступает в измерительно-вычислительный тракт 15.

Конструкция установки ТТУ–2 спроектирована с учетом требований по минимизации фоновых акустических и вибрационных помех. Виброизоляция стенда обеспечивается монтированием на двухслойном демпфирующем основании, состоящем из слоя войлока толщиной $\approx$ **10 мм** мм и пенополиуретана (поролона) толщиной $\approx$ **30 мм**. Нижняя поверхность опорного стола дополнительно изолирована пенополиуретановым покрытием толщиной $\approx$ **10 мм**. Для формирования акустического поля, близкого к свободному (или диффузному при соответствующих условиях), вся экспериментальная установка размещена в звукоизолирующей кабине.

Воспроизводимость и достоверность данных обеспечивались строгим единообразием формы и размеров образцов, постоянством массы ударника и динамических параметров возбуждаемой пластины [5–А]:

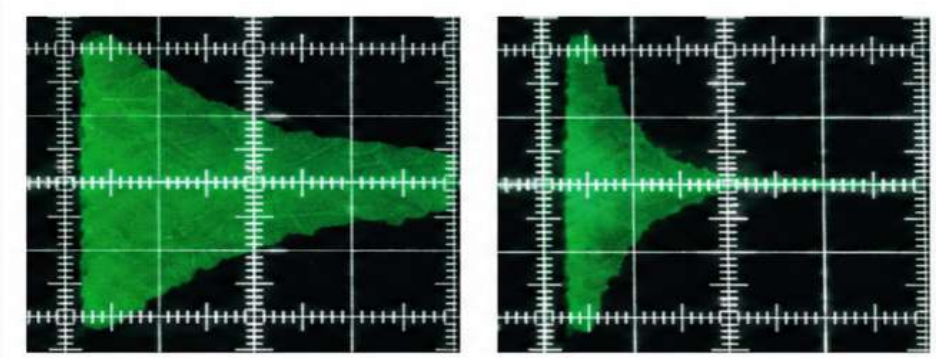
$$m < 4.6\rho\, l\, h \qquad (3.16)$$

где, ρ – плотность материала пластины, кг/м^3; l – расстояние от точки приложения удара до ближайшего края пластины, м; h– толщина пластины, м.

«Звук записывал микрофонный капсюль МК-102 под центром пластины, на расстоянии $\boldsymbol{r_1 \approx 100}$ **мм**. Ближе ставить нельзя, дальше тоже: прямой звук должен быть громче отражённого как минимум на $\mathbf{10}$: $\mathbf{1}$.

Чтобы отражения от стен кабины не мешали, расстояние от образца до отражающей поверхности $\boldsymbol{r_2}$ и от образца до микрофона $\boldsymbol{r_1}$ выбирают из условия» [46]:

$$r_2 \cong 5{,}5\ r_1 \qquad (3.17)$$



а) б)

Рисунок 3.2. – Осциллограммы затухающих колебаний а) сталь 45; б) виброакустодемпфирующий материал

Главным показателем демпфирования мы выбрали скорость затухания звука: она прямо пропорциональна коэффициенту затухания.

Скорость затухания звука находили по осциллограммам (рис. 3.5). Снимали время затухания $\boldsymbol{t_з}$ – за сколько амплитуда спадает от максимума $\boldsymbol{A_{max}}$ до фона; длительность звукового импульса $\boldsymbol{t_c}$; эквивалентный и пиковый уровни по линейной шкале импульсного шумомера; частотный диапазон по узкополосному анализатору.

Таким образом, Полученные аналитические и эмпирические зависимости позволяют комплексно определять вибродемпфирующие (акустические диссипативные) свойства конструкционных металлов и сплавов при ударном нагружении с учётом физико-механических характеристик, геометрии образца и спектрально-временных параметров звукоизлучения.

3.5. Методики измерения и расчета виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий

В разделе приведены результаты анализа и обоснование методики измерения и расчета виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий. На заводе шум, локальная вибрация через руки и общая вибрация через тело нередко действуют на человека одновременно. Поэтому одних замеров мало: нужно ещё рассчитать нормируемые показатели, сравнить их с нормами и оценить профессиональный риск. Измерения на рабочих местах опираются на стандарты ССБТ и согласованные с ними акты.

В работе уточнено, что «…главная измеряемая величина – уровень звукового давления в децибелах, то есть логарифм отношения действующего давления к пороговому» [40,43]:

$$L_p = 20\lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad (3.18)$$

где: L_p –уровень звукового давления, дБ; p – среднеквадратическое значение звукового давления, Па; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – пороговое звуковое давление.

Для непостоянного шума основным расчётным показателем является эквивалентный уровень звука:

$$L_{Aeq,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\int_0^T 10^{0{,}1L_A(t)}\,dt\right) \qquad (3.19)$$

где: $L_{Aeq,T}$ – эквивалентный уровень звука за период измерения T, дБА; $L_A(t)$ – текущий уровень звука по шкале А, дБА; T – продолжительность измерения, с.

Если производственный или транспортный шум состоит из интервалов с разными уровнями звука, эквивалентный (по энергии) уровень звука в дБА рассчитывают по дискретной формуле:

$$L_{Aeq,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} t_i \cdot 10^{0{,}1L_{Ai}}\right) \qquad (3.20)$$

где: t_i −продолжительность i–го интервала воздействия, с; L_{Ai} −уровень звука на i–м интервале, дБА; n −личество интервалов; $T = \sum t_i$ – суммарное время воздействия.

Для сравнения с нормативами воздействие шума приводят к стандартной 8-часовой рабочей смене. Эквивалентный уровень звука при этом определяется так:

$$L_{EX,8ч} = L_{Aeq,T} + 10\lg\left(\frac{T}{T_0}\right) \qquad (3.21)$$

где $L_{EX,8ч}$ – уровень шумового воздействия, приведенный к 8–часовому рабочему дню, дБА; T – фактическая продолжительность воздействия шума, ч; $T_0 -$ стандартная продолжительность рабочей смены, 8 ч.

В работе отмечается, что на промышленных предприятиях работник часто находится под воздействием нескольких источников шума. Суммарный уровень от независимых источников определяется по формуле:

$$L_\Sigma = 10\lg(\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_i}) \qquad (3.22)$$

где: L_Σ −суммарный уровень звука, дБ; L_i – уровень звука от i–го источника, дБ; n – количество источников шума.

В работе предложена Методика измерения общей и локальной вибрации. Основным измеряемым параметром вибрации является виброускорение; в зависимости от задач исследования измеряют также виброперемещение и виброскорость. Среднеквадратическое значение корректированного уровня виброускорения в дБ определяется по формуле:

$$L_a = 20\lg\left(\frac{a}{a_0}\right) \qquad (3.23)$$

где: L_a −уровень виброускорения, дБ; a – среднеквадратическое значение виброускорения, м/с²; a_0 – пороговое значение виброускорения, м/с².

Измерение вибрации производится по трем взаимно перпендикулярным осям $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{z}$, поскольку воздействие на человека зависит не только от величины колебаний, но и от направления их передачи. Для этого скорректированное среднеквадратическое виброускорение определяется в каждой оси по формуле:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2\,(t)dt} \qquad (3.24)$$

где: a_w – корректированное среднеквадратическое виброускорение, м/с²; $a_w(t)$—мгновенное значение виброускорения с учетом изменения частоты, м/с²; $T -$ продолжительность измерения, ч.

При дискретной обработке результатов используется следующее выражение:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} a_{wi}^2\, t_i} \qquad (3.25)$$

где: a_{wi} – корректированное виброускорение на i–м интервале, м/с²; t_i– продолжительность i–го интервала, ч; T – суммарная продолжительность воздействия, ч.

Результирующее значение общей вибрации с учётом осевых составляющих можно определить выражением:

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \qquad (3.26)$$

где: a_v – результирующее корректированное значение виброускорения; a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} – корректированные значения виброускорения по осям x, y, z; k_x, k_y, k_z – весовые коэффициенты, учитывающие различную чувствительность организма к вибрации по направлениям.

Для локальной вибрации результирующее значение обычно определяется как геометрическую сумму трех осевых составляющих:

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \qquad (3.27)$$

где: a_{hv} −суммарное значение локальной вибрации; a_{hwx}, a_{hwy}, a_{hwz} – корректированные значения виброускорения по трем осям.

Эквивалентное виброускорение за восьмичасовую смену с учётом и силы, и длительности вибрации считают так:

$$A(8) = a_v\sqrt{\frac{T}{T_0}} \qquad (3.28)$$

где: $A(8)$ – эквивалентное виброускорение при 8–часовой смене; a_v – измеренное или рассчитанное значение виброускорения, м/с²; T – фактическая продолжительность воздействия, ч; $T_0 = 8$ ч – продолжительность рабочей смены.

В работе уточнены организационные аспекты измерений виброакустических факторов на рабочем месте промышленных предприятий. Сначала пишут программу обследования: предприятие, участок, рабочее место, профессия, оборудование и его режим, длина смены, операции, вероятные источники шума и вибрации, точки и число замеров, приборы. Порядок измерения шума показан на рисунке рисунке 3.3



Рисунок 3.3. – Алгоритм оценки параметров производственного шума

Полученные результаты измерения и расчеты оформляются в виде таблицы, которые являются основой для принятия инженерных, организационных и санитарно–гигиенических решений для оптимизации управления предприятием.

В четвертый главе – «Закономерности формирования выброакустических и демпфирующих свойств металлов и сплавов различных металлических систем» приведена комплексные исследования виброакустодемпфирующих и механических свойств материалов на основе различных металлических систем, дана оценка влияния добавок на виброакустические свойства алюминиево-кремниевые литейных сплавов, влияние температуры и виды обработов и деформирование расплавов на виброакустодемпфирующие свойства алюминиевых сплавов.

4.1. Исследование виброакустодемпфирующих свойств литейных алюминиевых сплавов. Проведенные на разработанной автором установке ТТУ–2 исследованы виброакустодемпфирующих и механических свойств алюминиевых сплавов системы Al–Si (Sb, Ba, Sr). На свободно подвешенном образце этим методом получают сразу и характеристики излучаемого звука (эквивалентный уровень $L_{\text{экв}}$, пиковые уровни $L_{\max}$, спектр), и показатели потерь в самом металле – скорость затухания $v_{\text{зат}}$, логарифмический декремент δ, коэффициент механических потерь η (таблица 4.1).

Таблица 4.1. – Виброакустодемпфирующие и механические свойства исследуемых сплавов

Номер сплава	Содержание компонентов, масс. %				Виброакустодемпфирующие свойства		Механические свойства		
	Si	Mg	Sb, Ba, Sr,	Al	Уровень звука, дБА	Скорость затухания звука $d_з$, дБ/мс	Мпа, $\sigma_в$,	δ, %	НВ
1	6	0,1	0,005Sb	ост.	84	3,85	218	7,0	79
2	9	0,3	0,1Sb	–	87	3,46	226	5,6	77
3	6	0,1	0,005Ba	–	81	3,88	196	7,4	74
4	9	0,3	0,1Ba	–	80	4,21	202	8,0	75
5	6	0,1	0,005Sr	–	84	3,76	206	13,0	56
6	9	0,3	0,1Sr	–	82	4,18	212	12,0	58
7	9	0,25	–	–	95	2,18	160	3,2	56
8	12	0,25	–	–	93	2,42	170	2,4	49

Акустические характеристики этих сплавов (рисунке 4.1.) показали, что все сплавы, модифицируемые сурьмой, барием и стронцием, имеют низкие звукоизвлечения по сравнению с сплавами без модифицирования. Наименьшее звукоизлучение сплавы обладают на частоте 1000 Гц. Сплавы с модифицирующими элементами показали также достаточно высокие механические свойства (таблица 4.1.).

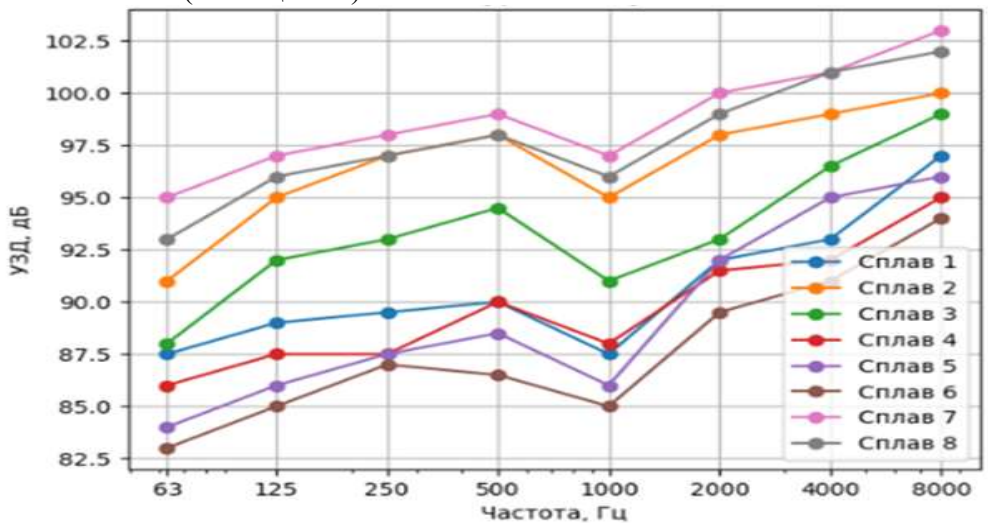


Рисунок 4.1. – Звукоизлучение исследуемых сплавов

У сплавов с модификаторами и скорость затухания $v_{зат}$, и коэффициент потерь η, и прочность заметно выше, чем у немодифицированных силуминов (таблица 4.2).

Таблица 4.2. – Виброакустодемпфирующие и механические свойства литейных сплавов

№ сплава	Механические свойства			Виброакустодемпфирующие свойства	
	$\sigma_в$ МПа	δ, %	НВ	Скорость затухания звука, $d_з$ дБ/мс	Коэффициент потерь, δ
1	218	14.0	62	3.06	0.30
2	234	7.0	79	3.84	0.44
3	215	7.2	59	2.36	0.24
4	196	6.5	54	2.85	0.31
5	202	8.0	75	4.22	0.52
6	206	13.0	56	3.78	0.48
7	212	12.0	58	2.19	0.24
8	192	5.2	48	2.17	0.16

Анализ данных, приведенные на рисунке 4.1 и таблице 4. показывают, что модифицированные стронцием, барием и сурьмой сплавы Al–Si звучат иначе, чем исходные силумины: у всех у них есть устойчивый провал уровня в октавной полосе 1000 Гц.

Мы объясняем это с позиций теории кристаллизации и модифицирования силуминов. Поверхностно-активные добавки дробят структуру: грубая пластинчатая эвтектика [α-Al + Si]

становится мелкой и волокнистой. Чем мельче фазы, тем больше суммарная длина межфазных границ, а на границах и теряется основная часть энергии колебаний. Значит, изучая демпфирование модифицированных сплавов Al–Si, нельзя отрывать его от фазовых превращений и от того, как меняется микроструктура. Диаграмма Al–Si и наши первые результаты подсказывают, что стоит подробнее разобраться, как количество модификатора и условия кристаллизации влияют на акустику материалов для деталей, работающих под ударами.

4.1.1. Влияние модифицирующих добавок на виброакустичекие характеристики алюминиево–кремнневых литейных сплавов

В подразделе отмечается, что малые добавки сурьмы, бария и стронция улучшают структуру сплавов Al–Si и вместе с ней демпфирование. Теперь надо выяснить, сколько добавки нужно и почему она действует, то есть каким путём рассеивается энергия ударных колебаний.

При этом возникает задача – оценки влияния содержания модифицирующих добавок на изменения виброакустодемпфирующих свойств исследуемых сплавов и выявить механизм рассеивание энергии механических колебаний, вызванные ударно–вибрационными процессами.

Виброакустические характеристики оценивали по уровню звука, скорости затухания и коэффициенту потерь.

Результаты представлены на рисунках 4.2 – 4.4.

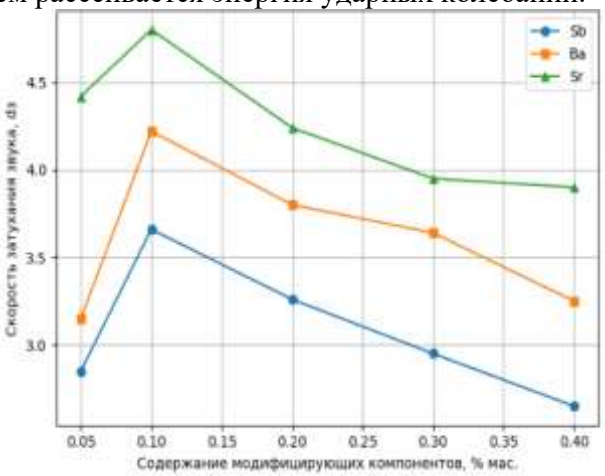


Рисунок 4.2. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на урони звука L_A сплава Al–6%Si (Sb, Ba, Sr)

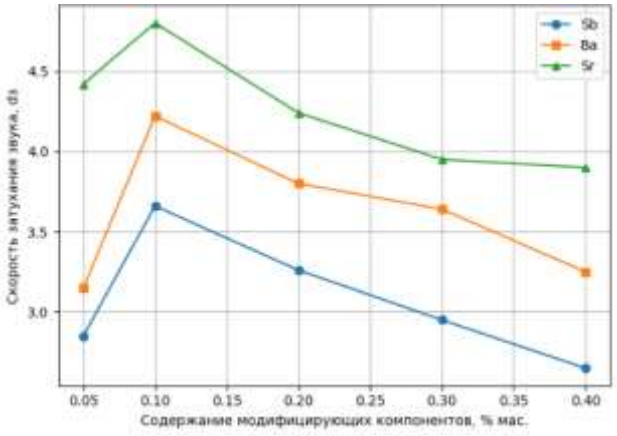


Рисунок 4.3. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на скорость затухания звука $d_з$ в сплавах Al–9%Si

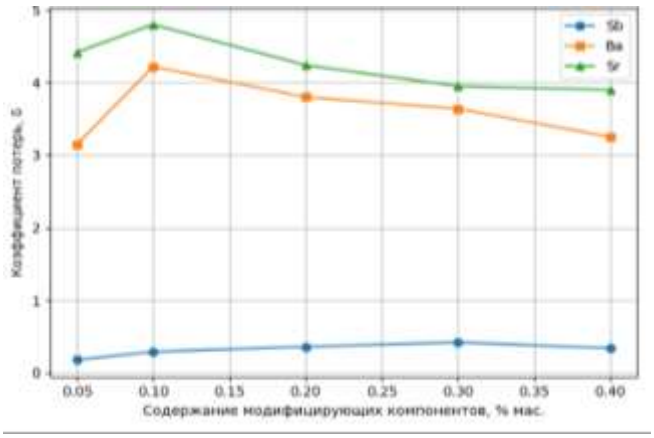


Рисунок 4.4. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на коэффициент потерь, δ сплава АК 12

В результате оценки свойств выявлено, что «…модифицирующие добавки (Sb, Sr, Ba) меняют термодинамическое состояние алюминиево-кремниевого расплава ещё до начала кристаллизации. Это связано со снижением межфазного поверхностного натяжения на границах расплава и подавлением диффузионной подвижности атомов кремния. Подтверждением служит устойчивое существование гетерофазных комплексов (наноразмерных кремниевых кластеров разной топологии) в высокотемпературной области расплава перед фазовым переходом. Это указывает на микрогетерогенную природу жидких силуминов» [1–А, 51].

В работе определено, что при промышленном производстве сплавов, модифицированных стронцием, барием и сурьмой, конечные свойства во многом зависят от

исходного металла и всей последующей технологической цепочки. Механические свойства сплавов АК9, модифицированных стронцием, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. – Зависимость виброакустодемпфирующих свойств сплава (L_A, $d_з$, δ) от времени выдержки

Время выдержки, час	Сплав	Уровень звука, L_A	Скорость затухания звука, $d_з$,	Коэффициент потерь, δ
2	АК 9 (Sr)	86	3,8	0,42
	АК 12 (Sr)	88	3,0	0,36
4	АК 9 (Sr)	84	4,0	0,46
	АК 12 (Sr)	85	3,4	0,39
6	АК 9 (Sr)	82	4,5	0,52
	АК 12 (Sr)	81	3,8	0,42
8	АК 9 (Sr)	80	5,2	0,60
	АК 12 (Sr)	79	4,2	0,48

Выявленные в работе изменения при получения исследуемых сплавов при разном количестве переплавов расплава показывают, что на виброакустические характеристики сплавов АК 9 и АК 12 с различным содержание компонентов существенное влияние оказывают время выдержки и количество переплавов расплавов. Таким образом, виброакустические характеристики и механические свойства сплавов существенно изменяются в зависимости от содержания модифицирующих компонентов и состояние обработки этих сплавов.

4.1.2. Влияние температуры и различных видов обработки расплавов на виброакустодемпфирующие свойства литейных алюминиевых сплавов.

В работе отмечается, что определение температуры и влияние различных видов обработки имеют важное практическое значение. Последнее связано с тем, что изменение температуры оказывает влияние практически на все физико–механические характеристики сплавов, определяющие условия эксплуатации реальных конструкций.

Как было показано в главе 2, разработанная установка для исследования виброакустических характеристик металлов и сплавов позволяет обеспечить нагрев образцов при температуре до 350°С. Сплавы исследовали в интервале 100–300°С. Характер изменения вибрационно-акустических и демпфирующих свойств у всех исследованных сплавов оказался практически одинаковым. Результаты испытаний сплава АК9, модифицированного сурьмой, барием и стронцием, приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. – Зависимость влияние температуры на виброакустодемпфирующие свойства сплава АК 9 (Sb, Ba, Sr)

Температура испытания, °С	Уровень звука, L_A	Скорость затухания звука, $d_з$,	Коэффициент потерь, δ
100	84	4,5	0,48
150	76	4,8	0,52
200	74	5,2	0,58
250	70	5,6	0,62
300	72	5,9	0,68

Такое изменение, прежде всего, зависит от повышения температуры виброакустодемпфирующие свойства модифицированного сплава АК9, которые заметно растут. По-видимому, это связано с модифицирующими добавками. В пределах 0,05–0,1 % мас. они повышают виброакустические характеристики сплава. Диаграмма состояния алюминий–кремний показывает, что в этих пределах добавки не меняют картины образования избыточных фаз в сплавах алюминиево-кремниевой эвтектики» [8, 38].

С учетом того, что «…на качество и свойства металлов и сплавов положительное влияние оказывают различные физические воздействия на расплав, такие как вибрация и ультразвук, для глубокого изучения влияния физического воздействия на расплав в процессе их получения важное значение имеет определение виброакустических и механических характеристик исследуемых сплавов исходя из таких воздействий на расплавы» [32–33].

Вибрационную обработку проводили на установке: расплав в кристаллизаторе (металлической фильере) помещали на вибрационную платформу и подвергали вибрации частотой от 1 до 100 Гц и амплитудой от 0,1 до 1,0 мм.

Виброакустические и демпфирующие свойства сплава АК9(Sr) до и после вибрационной обработки расплава представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. – Оценка влияния вибрационной обработки расплава на виброакустодемпфирующие свойства сплава АК 9 (Sr) до/после обработки

Содержание модифицирующих компонентов, % мас.	**Уровень звука, L_A (Дб)**	**Скорость затухания звука $d_з$, Мпа**	**Коэффициент потерь, δ**
0,05	86/88	4,6/4,8	0,46/0,48
0,1	84/86	4,9/5,0	0,48/0,50
0,2	82/84	5,3/5,4	0,54/0,54
0,3	80/82	5,6/5,8	0,56/0,58
0,4	76/75	5,8/6,0	0,62/0,66

Аналогично изучалось влияние ультразвука. Ультразвуковую обработку расплава перед кристаллизацией выполняли генератором УЗГ-10М: интенсивность излучения до 300 Вт/см², частота до 20 кГц, амплитуда 25 мкм. Продолжительность обработки составляла 0,1–0,5 мин при снижении температуры расплава с 720–750 °С до 450–500 °С. Виброакустодемпфирующие свойства сплава АК9(Sr) до и после ультразвуковой обработки приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. – Оценка влияния ультразвуковой обработки расплава на виброакустодемпфирующие свойства сплавов АК6, АК9 и АК12 до/после обработки

Сплавы	**Уровень звука, L_A**	**Скорость затухания звука, $d_з$**	**Коэффициент потерь, δ**
АК 6	82/84	4,01/3,76	0,51/0,48
АК 9	80/81,5	3,96/3,88	0,56/0,50
АК 12	75/80	4,12/4,02	0,58/0,51

Анализ в целом показал, что вибрационная и ультразвуковая обработка расплава, как видно из таблиц 4.5 и 4.6 меняет виброакустические характеристики сплавов.

Это можно объяснить тем, что вибрация и ультразвук в предкристаллизационный период повышают скорость охлаждения и механически диспергируют гетерогенные комплексы. В результате изменяется концентрационное распределение в микронеоднородном расплаве и улучшаются физико-механические свойства сплавов.

4.2. Исследование виброакустодемпфрующих свойств деформируемых алюминиевых сплавов.

Для исследования выбраны деформируемые алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg с медью, цирконием, титаном, марганцем, кремнием, хромом, железом и никелем. В отличие от литейных, они поддаются пластической деформации и поэтому могут иметь иные виброакустические характеристики. Легирующие компоненты заметно влияют на структуру и физико-механические свойства этих сплавов, а следовательно, и на виброакустические характеристики.

«…Алюминиевые деформируемые сплавы системы Al–Zn–Mg имеют высокие механические свойства, способности самозакалятся в воздухе и хорошие свариваемости и коррозионной стойкости, что делает их применение перспективным для изготовления ответственных деталей в различных отраслях промышленности» [52,53].

В работе отмечается, что комплексный методический подход к оценке служебных свойств деформируемых сплавов системы Al–Zn–Mg–РЗМ включает в себя анализ виброакустических, демпфирующих и механических характеристик. Акустические, диссипативные и физико-механические свойства исследуемых сплавов в исходном

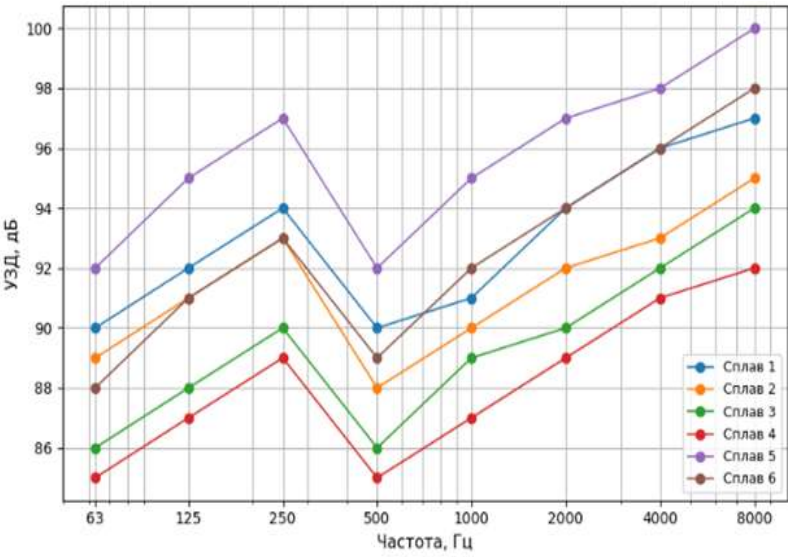


Рисунок 4.5. – Акустические характеристики исследуемых сплавов

(деформированном) состоянии, приведены на рисунках 4.5 и в таблице 4.7.

Анализ показывают, что акустические свойства (частотная зависимость уровня звукового давления и общего уровня звука) исследуемых сплавов существенно зависят от их состава: снижения содержания цинка до ≈ 2 ... 8 мас., % и магния – до ≈ 1 ... 3 мас., %, а также введения минимальных микродобавок редкоземельных металлов в диапазоне ≈ 0,05 ... 0,10 мас., %.

Минимум уровня звукового давления приходится на 500 Гц, то есть на этой частоте сплавы наиболее эффективно снижают виброакустические факторы. При указанных содержаниях микродобавок РЗМ сплавы показали также высокие виброакустодемпфирующие и механические свойства (таблица 4.7).

Таблица 4.7. – Виброакустодемпфирующие свойства и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–РЗМ

Номер сплава	**Механические свойства**			**Виброакустодемпфирующие свойства**	
	σ, МПа	**δ, %**	**НВ**	**Скорость затухания звука, dз дБ/мс**	**Коэффициент потерь,**
1	520	6.4	50.35	5.00	0.52
2	550	5.6	52.3	5.80	0.60
3	530	6,0	38.4	4.24	0.48
4	560	5,7	36.7	4.76	0.56
5	500	4.2	42.3	3.10	0.38
6	520	4.4	36.7	3.62	0.42

Для определения влияния концентрации цинка и магния на виброакустические свойства сплавов системы Al–Zn–Mg были изучены изменения уровня звука, скорости затухания звука и коэффициента потерь при различном содержании этих компонентов. Результаты исследований приведены в таблицах 4.8 и 4.9.

Таблица 4.8. – Влияние содержание цинка на виброакустодемпфирующие свойств сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Zn, %мас.	**Уровень звук, L_A**	**Скорость затухания звука, $d_з$**	**Коэффициент потерь, *δ***
2,0	80	7,4	0,78
4,0	84	6,8	0,66
6,0	86	5,6	0,58
8,0	90	4, 8	0,46

Как видно из таблицы 4.8, все исследуемые сплавы обладают высокими виброакустодемпфирующими свойствами, однако наибольшие значения параметров затухания звука и коэффициента потерь при снижении уровня звука приходятся на сплавы с содержанием цинка ≈ 2 ... 4 мас., %.

По магнию максимум значений показали сплавы с 1–2 % мас. Mg (таблица 4.9).

Таблица 4.9. – Влияние содержание магния на виброакустодемпфирующих свойств сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Mg, %мас.	**Уровень звук, L_A**	**Скорость затухания звука, $d_з$**	**Коэффициент потерь, δ**
1,0	82	7,4	0,76
2,0	85	6,8	0,66
3,0	88	5,6	0,58
4,0	92	4, 4	0,40

Кроме, того на виброакустодепфирующие способности существенно влияет на виброакустодемпфирующую способность и соотношение цинка и магния (таблица 4.10). Лучшие значения уровня звука, скорости затухания звука и коэффициента потерь достигаются при соотношении Zn:Mg = 2:1.

Таблица 4.10. – Влияние соотношение цинка в магний на виброакустодемпфирующие свойства сплавов Al–Zn–Mg

Соотношение цинка и магний	**Уровень звук, L_A**	**Скорость затухания звука, $d_з$**	**Коэффициент потерь, δ**
1:1	84	6,4	0,64
2:1	82	6,8	0,72
3:1	86	5,4	0,60
4:1	90	4, 7	0,48

Изменение содержании цинка и магния в исследуемых сплавах существенно влияют на их механические свойства (табл. 4.11). Анализ данных таблицы 4.11 показывает, что с изменением содержание цинка и магния механические свойства исследуемых сплавов повышаются.

Таблица 4.11. – Влияние содержание цинка и магния на механические свойства сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Zn, %мас.	**Химические элемнты**	**Предел прочности $\sigma_{в, Мпа}$**	**Предел текучести δ, %**	**Твердость, НВ**
2,0	цинк	600	7,4	78
	магний	590	6,6	74
4,0	цинк	620	6,8	72
	магний	600	6,0	68
6,0	цинк	624	5,6	70
	магний	610	5,8	62
8,0	цинк	632	4,8	66
	магний	622	5,2	64

В работе оценено степень влияния микродобавок редкоземельных металлов, гадолиния и иттербия на виброакустодемпфирующие свойства сплавов (рисунки 4.6– 4.8).

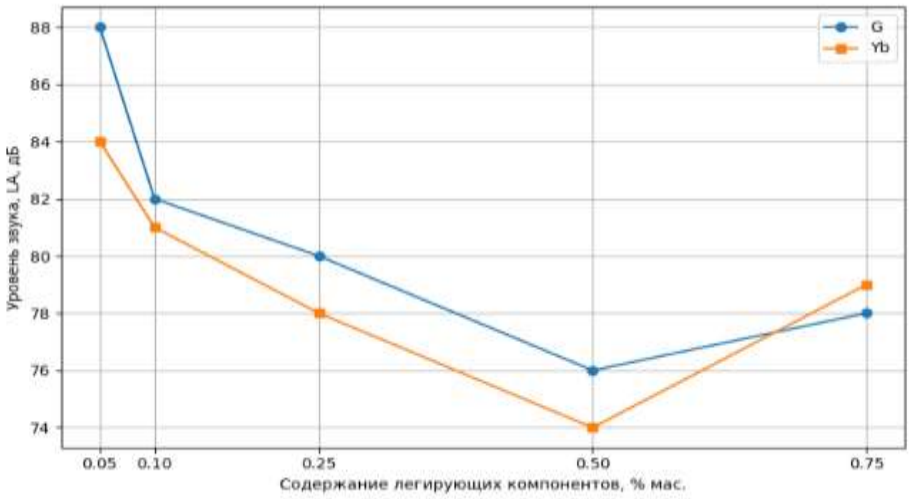


Рисунок 4.6. – Влияние содержания микродобавок гадолиния и иттербия на уровни звука сплавов системы Al–Zn–Mg

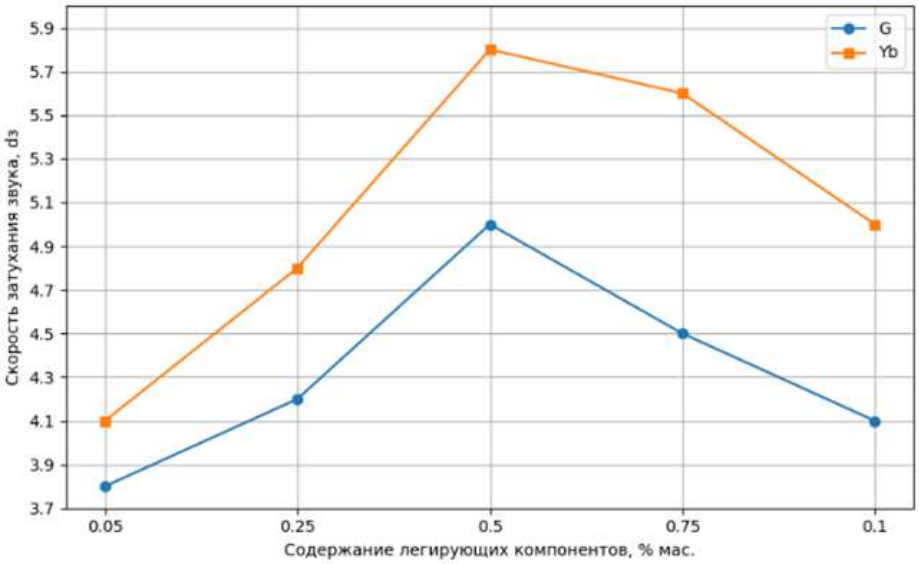


Рисунок 4.7. – Влияние содержания микродобавок гадолиния и иттербия на скорости затухания звука в сплавах системы Al–Zn–Mg

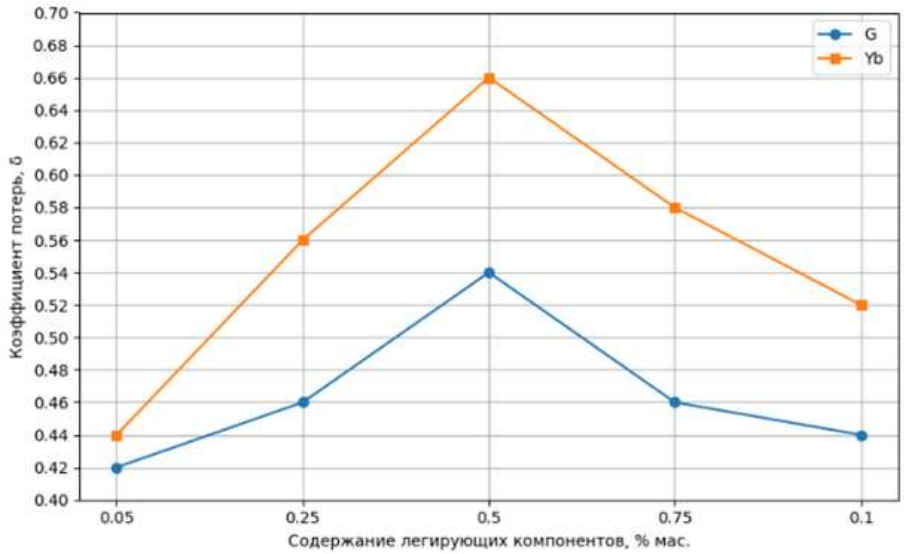


Рисунок 4.8. – Влияние содержания микродобавок гадолиния и иттербия на коэффициент потерь сплава системы Al–Zn–Mg

Анализ результатов, приведенных на рисунках 4.6 – 4.8, показали, что микродобавки гадолиния и иттербия вместе с цинком и магнием улучшают виброакустодемпфирующие характеристики сплавов. Наилучший результат получен при содержании Gd и Yb 0,5 % мас.; выше и ниже этого значения свойства заметно ухудшаются. Вероятно, это связано с особенностями взаимодействия компонентов в системе Al–Zn–Mg: в мягкой структуре сплава выделяются избыточные вторичные фазы, измельчающие зерно и тем самым влияющие на диссипацию энергии.

4.2.1. Влияние температруы на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов. В работе определено влияние температуры нагрева образца на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов. Как и у литейных сплавов, на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых сплавов влияет температура нагрева образцов; испытания проводили по методике раздела 2.3. Температурная зависимость здесь важна практически, так как от неё зависит применимость сплавов в реальных конструкциях. Результаты испытаний сплава Al–Zn–Mg с 0,5 % мас. микродобавок гадолиния и иттербия при нагреве до 100–300 °C приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12. – Зависимость влияние температуры на виброакустодемпфирующие свойства сплава Al–Zn–Mg с содержанием 0,5 % мас. микродобавок гадолиния и иттербия

Температура испытания, °С	100	150	200	250	300
Уровень звука, L_A	74	72	74	68	62
Скорость затухания звука $d_з$,	5,5	5,8	6,2	6,8	7,0
Коэффициент потерь, δ	0,56	0,62	0,68	0,72	0,78

С ростом температуры испытания виброакустодемпфирующие свойства сплавов Al–Zn–Mg с 0,5 % мас. Gd и Yb улучшаются. Это говорит в пользу их применения в реальных конструкциях, работающих при повышенных температурах.

4.2.2. Оценка влияние различных видов обработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Приведенные в работе оценки показали, что деформируемые алюминиевые сплавы Al–Zn–Mg обладают высокими виброакустодемпфирующими и механическими свойствами в литом состоянии.

Учитывая, что обработка давлением меняет исходные свойства, форму и структуру деформируемых алюминиевых сплавов и, следовательно, может повлиять на гашение вибрации и звукопоглощение. Поэтому в разделе рассмотрено влияние степени пластической деформации и термической обработки на виброакустические и механические свойства сплавов Al-Zn-Mg, легированных микродобавками РЗМ. Пластическая деформация при обработке давлением придаёт изделию нужную форму и одновременно меняет микроструктуру алюминиевых сплавов, во многом определяя их физико-механические и вибродемпфирующие свойства. Образцы получали горячей прокаткой и прессованием на прокатном стане и гидравлическом прессе по методикам работ [35–37]. Степень деформации варьировали в пределах 10–30 %. Перед горячей прокаткой образцы отжигали при 450 °С с выдержкой 4 часа; часть образцов подвергали закалке и двухступенчатому старению при 120–175 °С. Влияние степени пластической деформации на гашение вибраций и механические свойства приведено в таблице 4.13.

Таблица 4.13. – Влияние степени пластической деформации на виброакустодемпфирующие и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Номер сплава	**Степень пластической деформации, ε,%**	**Виброакустодемпфирующие свойства**		**Механические свойства**	
		Скорость затухания звука *дз, дБ/мс*	**Коэффициент потерь**	**$\sigma_в$, Мпа**	**δ,%**
1	Литое состояние	5.00	0.52	520	6,4
	10	5,26	0,55	525	6,0
	20	5,32	0,69	530	5,4
	30	5,86	0,72	540	4,0
2	Литое состояние	5,80	0,60	550	5,6
	10	6,16	0,69	555	5,0
	20	6,47	0,71	560	4,8
	30	6,82	0,86	300	4,2
3	Литое состояние	4,24	0,48	530	6,0
	10	5,01	0,59	535	5,4
	20	5,22	0,63	540	5,0
	30	5,56	0,69	548	4,7
4	Литое состояние	4,76	0,57	560	5,7
	10	4,84	0,58	565	5,2
	20	4,98	0,62	570	4,4
	30	5,15	0,68	580	4,2
5	Литое состояние	3,10	0,38	500	4,2
	10	3,84	0,48	506	4,0
	20	4,28	0,52	515	3,4
	30	4,96	0,66	525	3,0
6	Литое состояние	3,62	0,42	520	4,4
	10	3,94	0,54	525	3,8
	20	4,28	0,62	545	3,4
	30	4.95	0,68	520	2,9

Анализ результатов исследования степени влияния различной степени деформации на выброакустодемпфирующие и механические свойства исследуемых сплавов свидетельствует о том, что пластическая деформация образцов в диапазоне 10–30 % оказывает значительное влияние на формирование виброакустодемпфирующих и механических характеристик исследуемых сплавов (таблице 4.13).

Параметры зерна заметно влияют и на механические свойства, и на способность поглощать и рассеивать вибрационную энергию как в литом, так и в термообработанном состоянии. Чем мельче зерно, тем, как правило, выше прочность, пластичность и виброакустодемпфирующие характеристики.

Измельчить зерно можно разными способами: повысить скорость охлаждения при кристаллизации, ввести тугоплавкие элементы, образующие первичные интерметаллиды, применить специальные методы внешнего воздействия на жидкий металл. Внутреннее строение зёрен тоже зависит прежде всего от скорости охлаждения: чем она выше, тем дисперснее структура и выше прочность и пластичность. Эти закономерности подтверждаются микроструктурой сплавов до и после пластической деформации (рисунок 4.9).

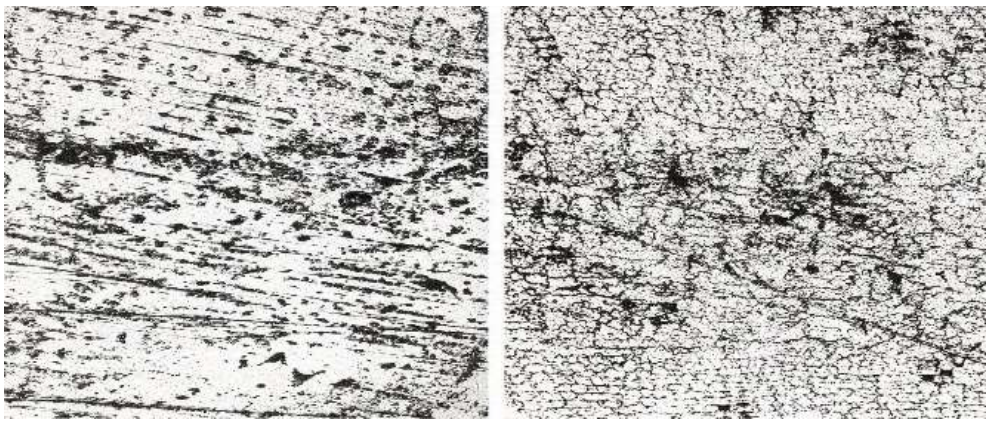


Рисунок 4.9. – Микроструктура сплавов деформируемых алюминиевых сплавов: а – до деформации; б–после деформации

Объяснение в том, что при горячей деформации в сплавах формируется выраженная субзёренная структура, меняющая сам механизм демпфирования. На смену акустически мягкой фазе исходной структуры приходит дислокационный механизм, зависящий от степени деформации. Чем она больше, тем выше вибрационно-акустические демпфирующие свойства. Значительно влияет на них и термическая обработка (таблица 4.14).

Таблица 4.14. Влияние термообработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Номер сплава	**Степень пластической деформации, ε,%**	**Вид и режим обработки**	**Виброакустодемпфирующие свойства**	
			Скорость затухания звука *dз,*	**Коэффициент потерь, *δ***
2	0	Закалка при 400°С, на воздухе	5,80	0,60
	10		6,20	0,64
	20		6,90	0,72
	30		7,12	0,79
4	0	Двухступенчатое старение	4,76	0,57
	10		5,48	0,65
	20		5,93	0,69
	30		6,18	0,74

Анализ данных таблицы 4.14 показал, что закалка и старение заметно изменяют виброакустодемпфирующие свойства сплавов при разных степенях деформации.

4.3. Исследование виброакустодемпфирующих свойста композиционных материалов на основе деформируемых алюминиевых сплавов. На базе проведенных выше **и**сследования раздела 4.2 показывают, что деформируемые алюминиевые сплавы систем Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–РЗМ обладают высокими виброгасящими и прочностными свойствами. Виброгасящая способность зависит от соотношения концентраций магния и цинка. Заметный

вклад вносит и легирование гадолинием (Gd) и иттербием (Yb). Положительный эффект связан со специфическим фазовым взаимодействием компонентов.

С учетом этих обстоятельств «деформируемые алюминиевые сплавы использовали в многослойных композиционных материалах; ранее такие композиции показали высокие акустодемпфирующие и механические свойства в условиях сверхпластичности» [46]. В работе исследованы многослойные композиты из стали и деформируемых алюминиевых сплавов в разных сочетаниях в обычных условиях.

Результаты исследования вибро- и звукопоглощающих свойств многослойных композитных материалов на основе деформируемых алюминиевых сплавов представлены на рисунке 4.10 и в таблице 4.15. Для исследуемых композитных материалов были выбраны следующие виброакустические параметры: уровень звукового давления, уровень звука, коэффициент затухания звука и коэффициент потерь в образце материала.

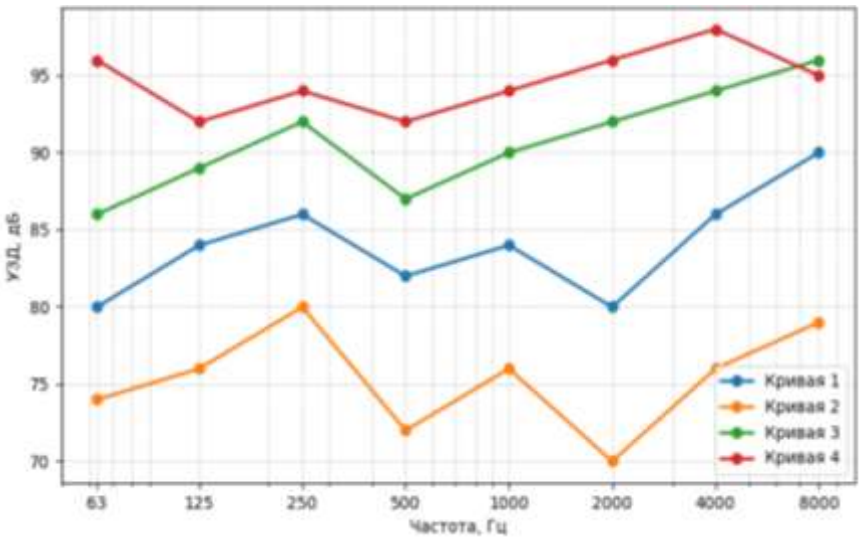


Рисунок 4.10. – Акустические свойства многослойных композиционных материалов

Из анализа данных рисунка 4.10 следует, что Многослойные композиты на основе деформируемых алюминиевых сплавов обеспечивают более низкие уровни звукового давления, чем базовые сплавы, на всех исследованных частотах. Минимумы приходятся на 500 и 2000 Гц, где материалы снижают виброакустические факторы наиболее эффективно. Свойства композиционных материалов приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15. Виброакустодемпфирующие и механические свойства исследуемых многослойных композиционных материалов

Номер композита	Механические свойства		Виброакустодемпфирующие свойства	
	σ, МПа	δ, %	Скорость затухания звука, dз дБ/мс	Коэффициент потерь,
1	675	5,8	6.0	0.62
2	595	6,2	6.8	0.80
3	385	3,6	4.24	0.48
4	550	5,6	4.76	0.56

Анализ данных таблицы 4.15 показал, что высокие виброакустодемпфирующие и механические свойства многослойных композитов объясняются их гетерофазной структурой: пластичная фаза деформируемого алюминиевого сплава сочетается с упругой стальной. Композиты с наружными слоями из деформируемого алюминиевого сплава, то есть с пластичной структурой снаружи, демпфируют лучше, чем композиты с упругими наружными слоями. При этом «…виброакустодемпфирующие характеристики композиционных материалов связаны с внутренним рассеиванием энергии механических колебаний в материале составляющих слоев и в зоне контакта слоев за счет соединения с деформирующем алюминиевом сплаве Al–Zn–Mg, которые легко образуют твердофазные соединения с другими металлами, обеспечивающий высокой конструкционной прочности и виброакустодемпфирующей способности композиционного материала» [9–А].

Анализ данных рисунка 4.10 и таблица 4.16 показал, что изменения виброакустодемпфирующих и механических свойств связаны со многими факторами: разнородностью структуры слоёв и сложностью процессов в переходной зоне. Поэтому в задачу исследования входило и изучение влияния этих факторов на виброакустодемпфирующие свойства многослойных композитов.

Исследование виброакустодемпфирующих и механических свойств многослойных композиционных материалов на основе деформируемых сплавов системы Al–Zn–Mg проводилось по методике, изложенной в разделе 2.4. По этой методики оценивали влияние толщины и чередования слоев, а также параметров их технологической обработки. Результаты исследования приведены на рисунках 4.11– 4.13.

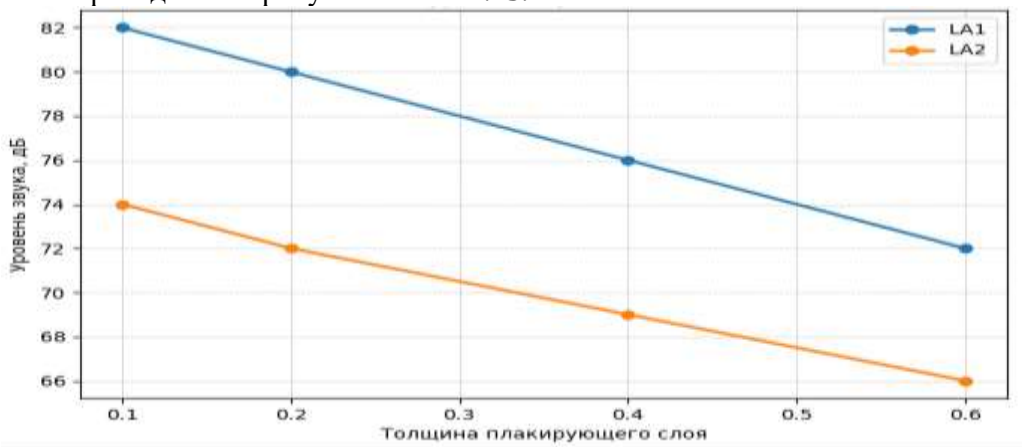


Рисунок 4.11. – Зависимость уровни звука от толщины плакирующего слоя

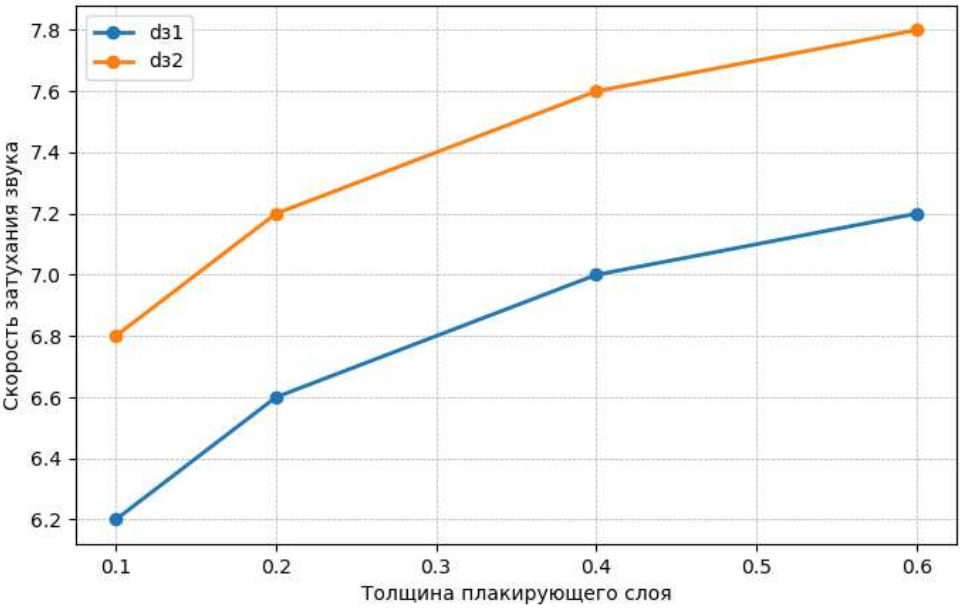


Рисунок 4.12. – Зависимость скорости затухания звука от изменения толщины плакирующего слоя

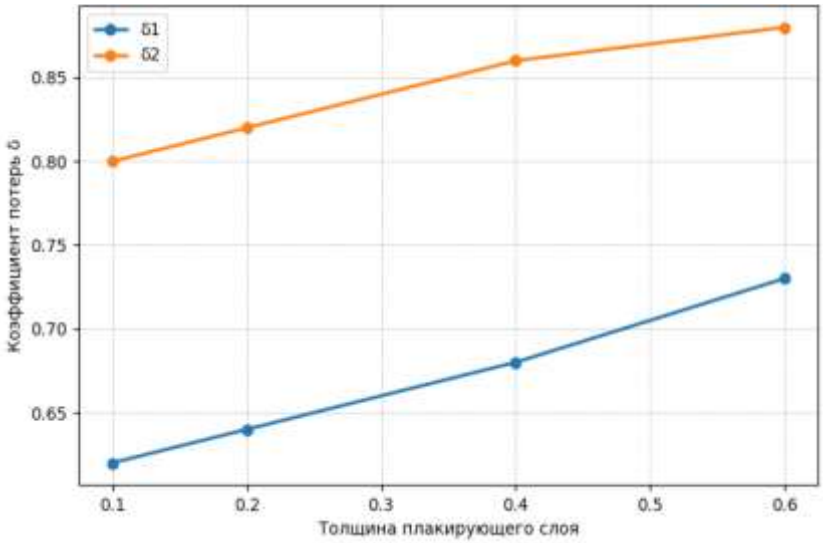
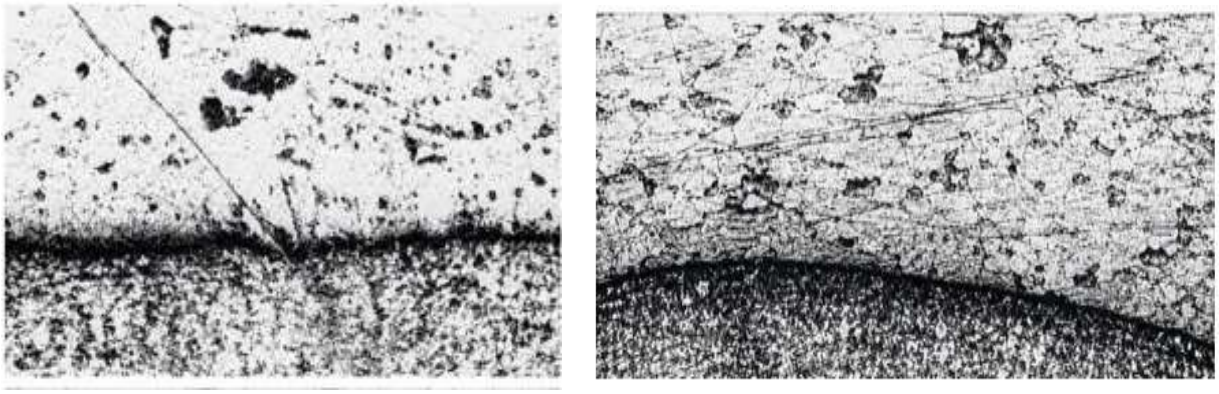


Рисунок 4.13. – Зависимость коэффициента потерь от изменения толщины плакирующего слоя

Как следует из рисунков 4.11–4.13 с увеличением толщины плакирующего слоя из деформируемого алюминиевого сплава виброакустодемпфирующие свойства композитов растут. Скорее всего, это связано с особенностями микроструктуры плакирующего слоя (рисунок 4.14).



а) **б)**

Рисунок 4.14. – Микроструктура композиционных материалов

В целом, «…в деформируемых алюминиевых сплавах Al–Zn–Mg с выраженной гетерогенной структурой виброакустические характеристики зависят от мягкой составляющей фазы цинка в алюминий или алюминия в цинке, а также и других особенностей взаимодействия легирующих компонентов в сплаве» [47].

Отсюда можно предположить, что именно рост доли деформируемого алюминиевого сплава при утолщении плакирующего слоя и улучшает виброакустодемпфирующие способности композиционных материалов.

В пятой главе – «Совершенствование системы управления охраной труда и разработкой средств защиты от виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий Таджикистана» анализирована,

5.1. Действующая система управления охраной труда и ее применимость на промышленных предприятиях

В работе отмечается, что система управления охраной труда (СУОТ) включает комплекс взаимосвязанных организационных, правовых, технических, гигиенических, профилактических и контрольных мер, направленных на сохранение жизни и здоровья работников на рабочих местах. Современная СУОТ не может ограничиваться формальным выполнением отдельных требований. Она действует как непрерывный механизм управления, в котором систематически выявляются опасности, оцениваются риски, планируются защитные меры и ведётся постоянный контроль условий труда с целью непрерывного совершенствования охраны труда на предприятии.

Модель СУОТ в соответствии с международными стандартами ISO 45001:2018 [53] и ILO–OSH 2001 [54] представлена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1. – Существующая модель системы управления охраной труда в соответствии с международными стандартами

В предложенной схеме (рисунке 5.1) отражена замкнута в кольцо. Безопасность здесь – не кампания, а постоянная часть управления предприятием. В центре – сама СУОТ с циклом «планирование – действие – контроль – проверка»; всё, что выяснилось при контроле и анализе, возвращается назад: цели уточняют, мероприятия пересматривают, недостатки устраняют. Благодаря этому система подстраивается под новое оборудование, технологии, риски и нормы.

В целом, из схемы видно главное: охрана труда работает, только если оценка рисков, планирование, выполнение, контроль и исправление идут непрерывно и друг за другом. На эту модель мы и опираемся, обосновывая систему оценки профессиональных рисков, в том числе от шума и вибрации.

5.2. Методологическое обоснование перехода от действующей СУОТ к риск–ориентированной модели управления виброакустическими факторами.

В работе отмечается, что действующая СУОТ промышленных предприятий создаёт организационную, правовую и профилактическую основу защиты работников: распределение обязанностей, инструктажи, обучение, обеспечение СИЗ, производственный контроль, расследование несчастных случаев, медосмотры, документацию. Однако современная производственная среда характеризуется сложным сочетанием опасных и вредных факторов, поэтому одной фиксации нарушений и выполнения стандартных мероприятий недостаточно для устойчивого снижения профессионального риска.

В работе отмечается, что структура применима к промышленным предприятиям Таджикистана, поскольку она соответствует национальному трудовому законодательству и позволяет контролировать безопасность на рабочих местах. Для промышленного сектора это особенно важно, поскольку многие предприятия страны относятся к производствам повышенной опасности. Горнорудные, металлургические, энергетические, строительные, машиностроительные и ремонтно-механические производства эксплуатируют машины, механизмы, технологические линии, транспорт, компрессорные, вентиляционные, дробильные, насосные и подъёмно-транспортные установки. На таких производствах наряду с общей охраной труда требуется обеспечение промышленной безопасности.

Закон Республики Таджикистан «О промышленной безопасности опасных промышленных предприятий» направлен на безопасную эксплуатацию опасных производств, предотвращение аварий и инцидентов и готовность организаций к локализации и ликвидации их последствий. Охрана труда на промышленных предприятиях должна поэтому тесно увязываться с технической эксплуатацией и диагностикой оборудования и управлением производственными рисками.

В работе особое значение придается управление виброакустическими факторами. «Шум и вибрация характерны для промышленных предприятий, на которых работают дробилки, вибрационные грохоты, компрессоры, насосы, вентиляторы, прокатные станы, кузнечно-прессовое оборудование, выбивные решётки, металлообрабатывающие станки, пневмоинструмент, транспортные механизмы. Природоохранное законодательство Республики Таджикистан, кроме того, предусматривает нормативы предельно допустимых уровней шума, вибрации и иных физических воздействий, обеспечивающие сохранение здоровья и трудоспособности людей» [46, 47].

В работе выявлен ряд обстоятельств, определяющие рименимость действующей СУОТ на промышленных предприятиях Таджикистана определяется четырьмя обстоятельствами. Во-первых, она имеет нормативную основу, закрепляющая ответственность работодателя за безопасные условия труда. Во-вторых, её элементы (выявление опасностей, инструктаж, контроль, обеспечение средствами защиты, расследование происшествий, профилактика) универсальны и подходят разным отраслям. В-третьих, она включает как общие организационные меры, так и специальные технические мероприятия против конкретных вредных факторов. В-четвёртых, её можно адаптировать к риск-ориентированной модели, отвечающей современной международной практике.

В работе для наглядного представления предлагаемая модель описывает последовательность управленческих и технических действий – от выявления источников шума

и вибрации до проверки эффективности принятых мер, после которой цикл повторяется (рисунок 5.2.).

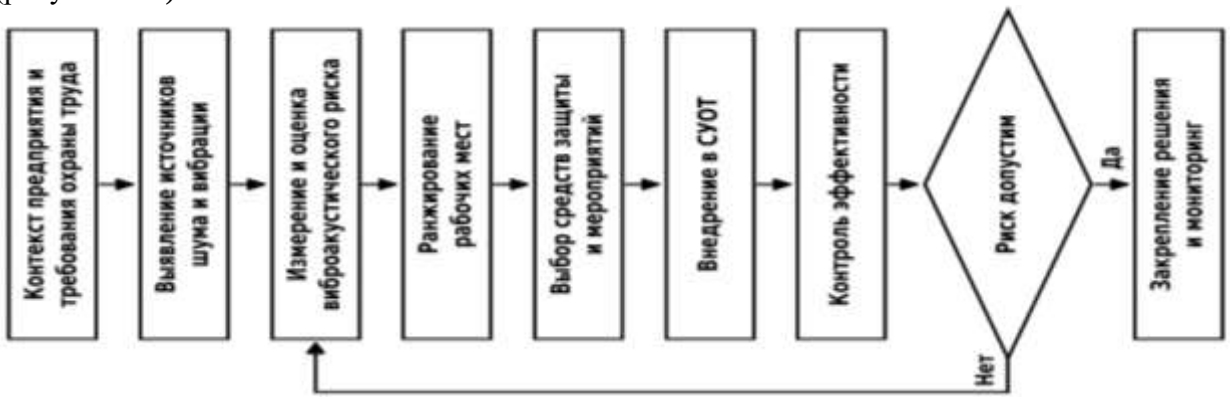


Рисунок 5.2. – Алгоритм совершенствования СУОТ при управлении виброакустическими рисками

Схема показывает, что управление шумом и вибрацией должно начинаться с выявления источников воздействия и завершаться не только внедрением защитных мероприятий, но и повторной оценкой их эффективности. Важной особенностью модели является наличие обратной связи, благодаря которой система охраны труда приобретает циклический характер и обеспечивает постоянство процесса улучшения условий труда.

Таким образом, такой переход позволяет заранее выявлять рабочие места с опасным уровнем шума и вибрации, направлять средства прежде всего на участки с высоким и критическим риском, связать охрану труда с ремонтом оборудования (износ, дисбаланс, ослабление креплений и дефекты рабочих органов прямо увеличивают шум и вибрацию) и количественно оценивать эффект инженерных мер, в том числе демпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов. Для предприятий Таджикистана с изношенным оборудованием и ударными процессами это особенно важно; в диссертации переход реализован в виде методики оценки виброакустического риска, встроенной в модель СУОТ.

5.3. Анализ существующих методов оценки профессионального риска

В работе отмечается, что современная система управления охраной труда на промышленном предприятии должна строиться не только на выявлении нарушений и последующем устранении последствий, но и на постоянной оценке профессиональных рисков. СУОТ должна не только выявлять нарушения, но и постоянно оценивать риски. Для шума и вибрации, действующих длительно и накопительно, риск определяется уровнем воздействия, временем контакта, состоянием оборудования, режимом работы, коллективной защитой и фактическим применением СИЗ.

В работе уточнено, что «методологической основой оценки профессионального риска выступают международные и национальные стандарты. ГОСТ Р ИСО 45001–2020 устанавливает требования к системе менеджмента безопасности труда и нацеливает организацию на управление рисками и возможностями в области охраны труда. Система строится на цикле постоянного улучшения PDCA: планирование, выполнение, проверка и действия по улучшению» [39].

В практике охраны труда применяются различные методы оценки профессионального риска. Условно их можно «разделить на нормативно–гигиенические, экспертные, балльные, индексные, вероятностные, технические и системные» [41, 42]. ISO 31000 задаёт общую логику: выявление, анализ, оценка, обработка риска, мониторинг, пересмотр. Стандарт подходит любой организации и любому риску. Для нас он важен тем, что оценку шума и вибрации нужно встраивать в общее управление рисками предприятия, а не держать как отдельную процедуру замеров.

Нормативно-методическую основу систем управления охраной труда образуют ISO 45001 и ILO–OSH 2001. Международный стандарт систем менеджмента охраны здоровья и безопасности труда ISO 45001 ориентирует организацию на выявление опасностей, оценку рисков и реализацию мер управления. Руководство ILO–OSH 2001 рассматривает управление охраной труда как совокупность взаимосвязанных элементов, направленных на защиту работников от профессиональных опасностей. Оба документа обосновывают циклический подход.

ISO 45001 и ILO–OSH 2001 рекомендуется взять за основу модели СУОТ, а расчёт риска выполнять по адаптированному интегральному индексу. Сравнительный анализ существующих методов оценки приведён в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Сравнительный анализ методов оценки профессионального риска

Метод	Учет факторов	Преимущества	Недостаток	Применимость
Нормативно–гигиенический	Фактическое превышение шума и вибрации	Прямая связь с нормативами	Не учитывает время, СИЗ и состояние оборудования	Базовый этап
Матричный	Вероятность и тяжесть	Простота и наглядность	Субъективность, слабый учет экспозиции	Первичная оценка
Файна–Кинни	Вероятность, экспозиция, последствия	Учитывает время воздействия	Не разделяет вклад шума, вибрации, СИЗ и оборудования	Сравнительный метод
Бальный	Экспертные оценки факторов	Удобен для комиссии	Низкая точность	Вспомогательный метод
Индексный	Несколько факторов в одном показателе	Комплексность и удобство ранжирования	Требует обоснования шкал и весов	Основа выбранной методики
FMEA	Отказы оборудования	Хорош для анализа причин роста шума и вибрации	Не оценивает всю систему условий труда	Технический анализ
HAZOP	Отклонения процесса	Подходит для сложных производств	Трудоемкость	Для отдельных участков
Bow–Tie	Причины, последствия и барьеры	Наглядность	Не является расчетным методом	Иллюстративная схема
ГОСТ Р ИСО 45001	Систему управления охраной труда	Подходит для модели СУОТ	Не содержит специальной формулы	Управленческая основа
ГОСТ Р ИСО 31000	Общий риск–менеджмент	Универсальная логика оценки риска	Требует адаптации к факторам труда	Методологическая основа

Как видно из таблицы 5.1, ни один из существующих методов не решает в полной мере задачу комплексной оценки виброакустического риска на рабочих местах. Нормативно-гигиенический метод нужен, чтобы установить факт превышения. Метод Файна–Кинни учитывает экспозицию, но не раскрывает структуру факторов. FMEA и HAZOP помогают анализировать технические причины риска, но интегральной оценки условий труда не дают. ISO 45001 и ISO 31000 задают управленческую рамку, но специализированной формулы для риска от шума и вибрации не предлагают. Поэтому наиболее целесообразен комбинированный подход. Нормативно-гигиеническая оценка устанавливает факт превышения шума и вибрации; международная логика ГОСТ Р ИСО 45001–2020 и ГОСТ Р ИСО 31000–2019 служит основой системы управления. Для практического ранжирования рабочих мест нужен специальный расчётный показатель, учитывающий особенности виброакустического воздействия.

Поэтому мы вводим показатель виброакустического риска $\boldsymbol{R_{va}}$, учитывающий шум, вибрацию, время воздействия, состояние оборудования и обеспеченность средствами защиты; он переносит международный риск-ориентированный подход на условия предприятий Республики Таджикистан.

5.4. Методический подход к оценке виброакустического риска на рабочих местах промышленных предприятий.

В работе отмечается, что оценка виброакустического риска должна включать комплексную характеристику условий труда. Для оценки риска по шуму определяют эквивалентный и максимальный уровни звука, спектр и длительность воздействия за смену, по вибрации – виброускорение, виброскорость, частотный диапазон, направление и вид (локальная или общая).

Основным методом оценки предлагается интегральный показатель виброакустического риска:

$$R_{va} = w_1 K_n + w_2 K_v + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s, \qquad (5.1)$$

где R_{va}– интегральный показатель виброакустического риска; K_n – коэффициент воздействия шума; K_v – коэффициент воздействия вибрации; K_t – коэффициент продолжительности воздействия; K_e – коэффициент технического состояния оборудования;

K_s – коэффициент недостаточности средств защиты; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – весовые коэффициенты значимости факторов соответственно.

Для базового варианта оценки могут быть приняты следующие весовые значения коэффициентов (таблица 5.2).

Таблица 5.2. – Базовые весовые значения коэффициентов для оценки профессионального риска

Факторы	**Обозначение**	**Весовые коэффициенты**
Шумовое воздействие	K_n	0,30
Вибрационное воздействие	K_v	0,30
Продолжительность воздействия	K_t	0,15
Техническое состояние оборудования	K_e	0,15
Недостаточность средств защиты	K_s	0,10
Итого		1,00

В работе весовые коэффициенты выбраны так: наибольший вес имеют шум и вибрация как основные физические факторы; продолжительность воздействия и состояние оборудования получили меньший, но существенный вес, так как от них зависит фактическая нагрузка; недостаточность средств защиты учтена с наименьшим весом, поскольку СИЗ – последняя мера защиты.

В показателе измеренный шум или вибрация учитываются вместе с условиями работы: при одинаковом шуме риск выше там, где человек находится у источника всю смену, а неподходящие к спектру или неиспользуемые СИЗ риск не снижают. Для перевода значений показателя в решения предложена шкала (таблица 5.3), которая помогает службе охраны труда обосновывать затраты на кожухи, виброизоляцию, ремонт, СИЗ и обучение.

Таблица 5.3. – Шкала интерпретации интегрального профессионального риска

Значение индекса R_{va}	**Уровень риска**	**Управленческие решения**
0–0,30	Низкий	Плановый контроль, поддержание существующих мер
0,31–0,60	Умеренный	Корректировка режима труда, проверка СИЗ и др.
0,61–0,80	Высокий	Разработка инженерных мер,
0,81–1,00	Критический	Немедленное снижения воздействия, врем. ограничение работ

В работе с целью Нормирование коэффициентов интегральной модели. Для расчёта по формуле 5.1 все показатели приводятся к шкале от 0 до 1.

Коэффициент шумового воздействия K_n оценивают по превышению фактического уровня шума над допустимым:

$$K_n = \frac{L_f - L_{\text{доп}}}{L_{max} - L_{\text{доп}}}, \qquad (5.2)$$

где: L_f –фактический уровень шума; $L_{\text{доп}}$ –допустимый уровень шума; L_{max} – условный верхний уровень, принимаемый для нормирования.

При шуме не выше допустимого $\boldsymbol{K_n}$ коэффициент принимают равным 0, при крайне неблагоприятных уровнях он приближается к 1.

$$K_v = \frac{X_f - X_{\text{доп}}}{X_{max} - X_{\text{доп}}}, \qquad (5.3)$$

где: X_f – фактическое значение вибрационного параметра; $X_{\text{доп}}$ –допустимое значение; X_{max} – условный верхний уровень вибрации для нормирования.

Для практических расчетов $\boldsymbol{K_v}$ также ограничивается диапазоном от 0 до 1.

Коэффициент продолжительности воздействия $\boldsymbol{K_t}$. . Его удобно выражать долей смены:

$$K_t = \frac{T_f}{T_s}, \qquad (5.4)$$

где: T_f –фактическое время воздействия; T_s – продолжительность рабочей смены.

Техническое состояние оборудования может быть оценено экспертно или на основе технической диагностики оборудования, а коэффициент недостаточности средств защиты K_s. отражает, насколько существующие средства защиты недостаточны для снижения риска (таблица 5.4).

Таблица 5.4. – Значение коэффициента технического состояния оборудования и недостаточности средств защиты

Состояние оборудования	K_e	**Состояние защиты**	K_s
Исправное, новое или модернизированное	0,20	Коллективная защита и СИЗ эффективны	0,10
Удовлетворительное	0,40	Защита имеется, но требует контроля	0,30
Средний износ	0,60	Защита частичная	0,50
Выраженный износ	0,80	Защита недостаточная	0,70
Аварийное или предаварийное состояние	1,00	Защита отсутствует	1,00

Предлагаемая в работе шкала связывает расчётный показатель с конкретными управленческими решениями. На промышленных предприятиях это важно, поскольку ресурсы на модернизацию оборудования и средства защиты приходится распределять по приоритетности. (таблица 5.5).

Таблица 5.5. – Шкала для интерпретации показателя виброакустического риска

Значение R_{va}	**Уровень риска**	**Характеристика**	**Управленческое решение**
0–0,30	Низкий	Воздействие контролируемое	Плановый контроль
0,31–0,60	Умеренный	Имеются неблагоприятные факторы	Организационные меры, контроль СИЗ, профилактика
0,61–0,80	Высокий	Риск требует вмешательства	Инженерно–технические меры, ограничение времени воздействия
0,81–1,00	Критический	Условия требует срочное вмешательства	Модернизация, изоляция, ограничение работ

Примеры расчета виброакустического риска для различных производств свидетельствует о том, что наиболее высокий риск характерен для оборудования ударного, дробильного и вибрационного действия. Последнее подтверждает необходимость первоочередного внедрения инженерно–технических мер защиты именно на данных участках (таблицы 5.6 и 5.7).

В работе отмечается, что средства защиты от виброакустических факторов целесообразно разрабатывать и внедрять по иерархическому принципу: сначала устраняются или снижаются причины возникновения шума и вибрации, затем применяются коллективные средства защиты, далее организационные меры и только после этого средства индивидуальной защиты.

Таблица 5.6. – Данные расчетов R_{va} для различных производств металлообработки

Производство / участок	**Оборудование**	K_n	K_v	K_t	K_e	K_s	R_{va}	**УР**
Металлообработка	Токарный станок	0,32	0,31	0,75	0,50	0,30	0,407	У
Металлообработка	Шлифовальный станок	0,56	0,56	0,88	0,60	0,40	0,598	У
Компрессорный участок	Компрессор	0,72	0,44	0,75	0,70	0,50	0,616	В
Дробильно–сортировочный участок	Дробилка	0,88	0,88	0,88	0,80	0,50	0,830	К
Энергетическое хозяйство	Насос / вентилятор	0,40	0,19	0,63	0,50	0,30	0,377	У
Ремонтно–механический участок	Пневмоинструмент	0,64	1,00	0,50	0,60	0,60	0,717	В
Транспортный участок	Погрузчик	0,24	0,69	0,63	0,50	0,40	0,489	У
Сварочно–сборочный участок	Вентиляция и ручной инструмент	0,36	0,13	0,75	0,40	0,30	0,350	У

Примечание: УР–уровень риска, У–умеренный, В–высокий, К–критический

По результатам расчётов установлено, что наибольший уровень виброакустического риска наблюдается на дробильно-сортировочном участке (R_{va} = 0,830), что соответствует критическому уровню (К). Высокий риск выявлен при использовании пневмоинструмента и эксплуатации компрессора (0,717 и 0,616 соответственно). На остальных участках риск оценивается как умеренный (0,350–0,598). Полученные результаты позволяют определить приоритетные направления профилактических мероприятий и разработать меры по снижению виброакустической нагрузки на работников.

Таблица 5.7. – Данные расчетов R_{va} для оборудования горнорудного и металлургического производства

№	Производство	Обору–дование	K_n	K_v	K_t	K_e	K_s	R_{va}	УР
1	Горнорудное	Дробильная установка	0,96	0,92	0,88	0,80	0,50	0,866	К
2	Горнорудное	Вибрационный грохот	0,68	1,00	0,75	0,60	0,40	0,747	В
3	Металлургия	Выбивная решетка	0,92	1,00	0,63	0,80	0,60	0,851	К
4	Металлургия	Прокатный стан	0,76	0,69	0,75	0,60	0,60	0,698	В

Примечание: УР–уровень риска, К–критический, В–высокий,

Расчёты (таблица 5.7) показывают, что наиболее высокий риск характерен для оборудования ударного, дробильного и вибрационного действия. Именно здесь инженерно-технические меры защиты нужно внедрять в первую очередь.

5.5. Разработка средств защиты от виброакустических факторов

Средства защиты от виброакустических факторов целесообразно применять в определённой последовательности: сначала устранить или ослабить причины шума и вибрации, затем применить коллективные средства, далее организационные меры и лишь в последнюю очередь средства индивидуальной защиты.

Инженерно-технические меры защиты от виброакустических факторов приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.8. – Инженерно–технические меры защиты от виброакустических факторов

Источник риска	Средства защиты
Дробильные установки	Шумозащитные укрытия, виброизолирующие основания
Вибрационные грохоты	Виброопоры, демпфирующие прокладки, контроль креплений
Компрессоры	Шумозащитные кожухи, виброизоляция, диагностика подшипников
Вентиляторы	Шумоглушители, балансировка ротора, виброопоры
Прокатные станы	Акустические экраны, вибродиагностика, техническое обслуживание приводов
Выбивные решетки	Акустическое ограждение, амортизирующее основание, изоляция зоны
Пневмоинструмент	Антивибрационные рукоятки, инструмент с пониженной вибрацией
Рольганги	Виброакустодемпфирующие ролики

Инженерные меры наиболее значимы, так как они снижают воздействие прямо в источнике или на пути распространения.

Организационные мероприятия сокращают время и интенсивность воздействия виброакустических факторов (таблица 5.9).

Таблица 5.9. – Организационные меры от воздействия виброакустических факторов

Мероприятие	Содержание
Ротация работников	Чередование операций с высоким и низким уровнем воздействия
Ограничение врем. пребывания	Установление допустимой продолжительности работы в опасной зоне
Регламентированные перерывы	Снижение накопительного воздействия шума и вибрации
Обучение работников	Информирование о рисках и правилах применения СИЗ
Маркировка опасных зон	Обозначение участков повышенного шума и вибрации
Дистанционное управление	Исключение постоянного пребывания работника возле источника

К средствам индивидуальной защиты относятся противошумные наушники и вкладыши, каски с шумозащитными элементами, антивибрационные перчатки, специальная обувь, амортизирующие коврики и сиденья.

Однако СИЗ не могут быть единственным способом защиты, поскольку они эффективны лишь вместе с инженерными и организационными мерами.

Предложенная модель (рисунок 5.2) может внедряться по алгоритму, приведённому в таблице 5.10.

Таблица 5.10. – Алгоритм модели совершенствования СУОТ при управлении виброакустическими рисками

Этап	Содержание	Результат
1	Создание рабочей группы	Назначены ответственные лица
2	Инвентаризация источников шума и вибрации	Сформирован реестр оборудования
3	Инструментальные измерения	Получены фактические уровни воздействия
4	Расчет R_{va}	Определен уровень риска
5	Ранжирование рабочих мест	Выделены приоритетные участки
6	Разработка мер защиты	Подготовлена программа мероприятий
7	Внедрение решений	Реализованы технические и организационные меры
8	Повторный контроль	Оценена эффективность
9	Корректировка СУОТ	Обновлены инструкции, карты риска и планы

Такой алгоритм позволяет превратить оценку шума и вибрации из формальной процедуры в управленческий инструмент, обеспечивающий постоянное снижение профессионального риска.

5.6. Применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов как инженерного средства защиты

В работе в качестве одного из перспективных направлений снижения виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий предложено применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов. Данный подход относится к инженерно–техническим средствам защиты и направлен на снижение передачи вибрации, уменьшение структурного шума и ослабление колебательных процессов, возникающих при работе промышленного оборудования.

Актуальность применения таких материалов обусловлена тем, что значительная часть виброакустического воздействия на горнорудных, металлургических, энергетических и ремонтно-механических предприятиях значительная часть виброакустического воздействия не остаётся в зоне источника, а распространяется по металлическим конструкциям: корпусам оборудования, опорам, кожухам, рамам, площадкам обслуживания, технологическим основаниям. Традиционные меры (выдача СИЗ или ограничение времени пребывания в опасной зоне) в такой ситуации снижают риск недостаточно. Поэтому необходимы материалы и конструкции, гасящие вибрацию и шум на путях их распространения.

Демпфирующие материалы на алюминиевой основе используют как вставки, панели, облицовки, кожухи, прокладки, промежуточные слои, виброизолирующие пластины и части комбинированных конструкций. Они уменьшают размах колебаний, меньше пропускают вибрацию на несущие конструкции, снижают структурный шум и делают кожухи эффективнее.

В работе с инженерной точки зрения обоснованы причины применения алюминиевых сплавов в виброакустодемпфирующих материалах. Так, алюминиевые сплавы обладают сравнительно малой плотностью, достаточной механической прочностью, технологичностью, коррозионной стойкостью и возможностью использования в составе многослойных конструкций. Последнее позволяет разрабатывать защитные элементы, которые не создают чрезмерной дополнительной нагрузки на оборудование и строительные конструкции, но при этом способны выполнять функцию вибродемпфирования и акустического ослабления.

В работе указано на перспективность применения таких материалов в составе многослойных конструкций типа «металл – демпфирующий слой – металл» либо «алюминиевый сплав – вибропоглощающий слой – защитная облицовка» [10-А]. Алюминий держит и распределяет нагрузку, демпфирующий слой переводит часть энергии колебаний в тепло – отсюда и меньше вибрации и шума.

В работе разработан алгоритм, применяемый для оценки эффективности применения виброакустодемпфирующих материалов в системе управления охраной труда, который отражает последовательность действий от выявления источников виброударных процессов до повторного контроля и корректировки принятых решений (рисунок 5.3). Данный алгоритм позволяет связать инженерные характеристики материала – коэффициент потерь η_m и скорость затухания звука V_z – с интегральным показателем виброакустического риска R_{va}.

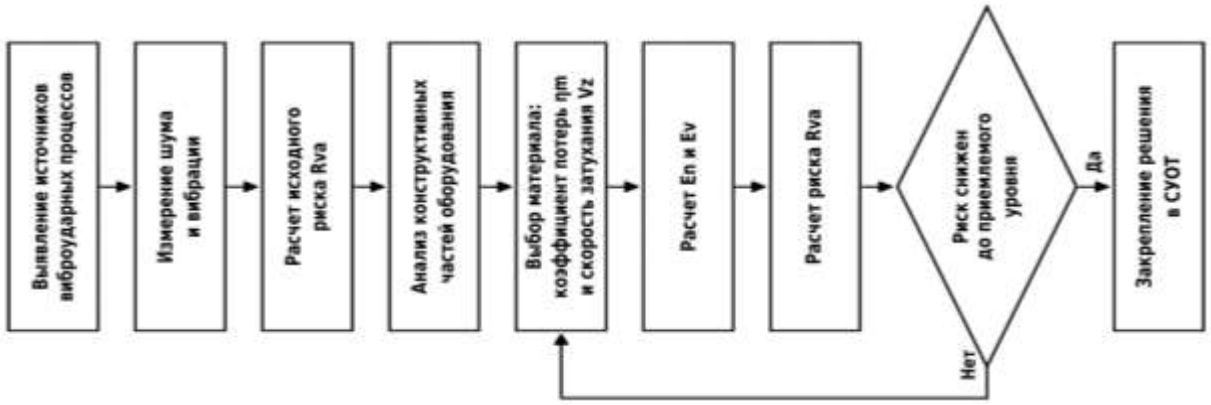


Рисунок 5.3. – Алгоритм оценки эффективности применения виброакустодемпфирующих материалов в системе управления охраной труда

Представленная схема отражает последовательность действий по выявлению источников виброакустических факторов, оценке исходного риска, выбору средств снижения шума и вибрации и последующей проверке эффективности принятых решений. Она построена по принципу последовательного анализа с обратной связью, позволяющей корректировать выбор защитных материалов и технических средств до достижения приемлемого уровня риска. Таким образом, блок-схема представляет собой итерационный алгоритм оценки и управления виброакустическим риском на производстве. Основное преимущество блок-схемы заключается в наличии обратной связи, позволяющей последовательно корректировать защитные мероприятия до достижения установленного критерия приемлемости риска.

В отличие от традиционного подхода, при котором защитные мероприятия оцениваются преимущественно по факту их наличия, предложенная схема позволяет оценивать реальное снижение риска. Это достигается за счет включения в расчет физических характеристик материала, как коэффициента потерь η_m и скорости затухания звука V_z. Таким образом, алгоритм позволяет связывать три уровня исследования: механический, инженерный и управленческий. На механическом уровне учитывается способность материала рассеивать энергию виброударных колебаний. На инженерном уровне выбирается конструктивное решение для деталей и узлов оборудования. На управленческом уровне результат выражается через снижение интегрального риска и закрепляется в системе управления охраной труда.

Практическая ценность схемы заключается в том, что она может использоваться специалистами по охране труда и инженерно–техническими службами промышленных предприятий для выбора материалов, обоснования модернизации оборудования и оценки эффективности принятых защитных мероприятий. Особенностью предлагаемого алгоритма является наличие обратной связи. Это означает, что применение материала не рассматривается как разовое мероприятие. После расчета остаточного риска выполняется проверка: если риск снижен до приемлемого уровня, решение закрепляется в системе управления охраной труда; если риск остается повышенным, проводится корректировка конструкции, дополнительных мер защиты и повторный выбор материала.

В работе отмечается, что «применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов для изготовления конструктивных частей оборудования может быть обосновано с позиций классической механики. Источником виброакустических факторов во многих технологических операциях являются виброударные процессы, возникающие при соударении деталей машин, рабочих органов, заготовок, элементов оснастки и механизмов» [11-А Энергия удара при этом расходуется по трём направлениям: часть идёт на полезную технологическую работу, часть переходит в упругие колебания конструкции, часть рассеивается в материале за счёт внутреннего трения и демпфирования.

По закону сохранения энергии энергию ударного взаимодействия можно записать в виде [33]:

$$E_{уд} = E_{п} + E_{к} + E_{р} + E_{зв} \qquad (5.5)$$

где: $E_{уд}$ - энергия удара; $E_{п}$ – энергия, затраченная на полезный технологический процесс; $E_{к}$ – энергия упругих колебаний конструкции; $E_{р}$ – энергия, рассеиваемая материалом; $E_{зв}$ – энергия, излучаемая в виде звуковых колебаний.

«С точки зрения охраны труда наиболее нежелательными являются составляющие $E_к$ и $E_{зв}$, поскольку первая вызывает вибрацию конструктивных элементов оборудования, а вторая формирует производственный шум. Следовательно, задача виброакустической защиты состоит в том, чтобы уменьшить долю энергии, переходящей в колебания и шум, и увеличить долю энергии, рассеиваемой внутри материала» [33].

Если элементы конструктиции выполены из материала с низкими демпфированием, то после удара в системе возникают длительные свободные колебания. В простейшем случае процесс описывается уравнением затухающих колебаний:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \qquad (5.6)$$

где: m – масса колеблющегося элемента; c – коэффициент демпфирования; k – жесткость системы; F(t) – внешняя ударная сила; x – перемещение; $\dot{x}$ – скорость; $\ddot{x}$ – ускорение.

Из этого уравнения следует, что амплитуда колебаний зависит не только от массы и жесткости конструкции, но и от коэффициента демпфирования. «Чем выше коэффициент демпфирования $\boldsymbol{c}$, тем быстрее уменьшается амплитуда колебаний после удара. Поскольку вибрация рабочих мест и структурный шум связаны с колебаниями конструктивных элементов оборудования, повышение демпфирующей способности материала приводит к снижению уровня виброакустического воздействия» [33].

Затухающие колебания могут быть представлены выражением:

$$x(t) = A_0 e^{-\delta t}\cos(\omega_d t + \varphi), \qquad (5.7)$$

где: A_0 – начальная амплитуда колебаний; δ – коэффициент затухания; ω_d – частота затухающих колебаний; φ – начальная фаза.

Из выражения следует, что при увеличении коэффициента затухания δ амплитуда колебаний уменьшается быстрее. Следовательно, материал с более высокой способностью к рассеянию энергии снижает продолжительность и интенсивность виброударного отклика конструкции.

Коэффициент потерь связан с демпфированием и служит характеристикой способности материала рассеивать механическую энергию:

$$\eta_m = \frac{E_р}{E_н}, \qquad (5.11)$$

где: η_m – коэффициент потерь материала; $E_р$ – энергия, рассеиваемая за цикл колебаний; $E_н$ – энергия, накопленная в материале при деформации.

При этом, коэффициент потерь показывает, какая часть механической энергии не возвращается обратно в виде упругих колебаний, а рассеивается внутри материала. Чем больше η_m, тем меньше энергии остается на возбуждение вибрации конструкции после удара.

Для виброударных процессов это положение особенно важно. При соударении деталей машин возникает кратковременный импульс силы:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} F\,(t)dt, \qquad (5.12)$$

где: J – импульс силы; F(t) – ударная сила; t_1, t_2 – начало и конец контакта.

Анализ показал, что чем жестче контакт и ниже демпфирование материала, тем более резким становится импульс силы и тем выше амплитуда возникающих колебаний. Материал с повышенным демпфированием часть энергии удара рассеивается, контакт становится менее «звонким», а колебательный отклик конструкции уменьшается.

В работе отмечается, что структурный шум возникает, когда вибрирующие элементы оборудования начинают излучать звуковые волны в окружающую среду. Чем выше амплитуда и скорость колебаний поверхности, тем больше излучаемая звуковая энергия.

Упрощённо это можно выразить так:

$$W_{зв} \sim v^2, \qquad (5.13)$$

где: $W_{зв}$ – звуковая мощность, излучаемая поверхностью; v – колебательная скорость поверхности.

Поскольку колебательная скорость связана с амплитудой вибрации, снижение вибрации конструктивных элементов приводит к снижению излучаемого шума. Поэтому применение виброакустодемпфирующих материалов одновременно влияет на две составляющие риска: K_v – вибрационную составляющую; K_n – шумовую составляющую.

Если в исследовании используется показатель скорости затухания звука в материале V_z, выраженный в дБ/с, то его можно трактовать как характеристику интенсивности уменьшения акустического отклика после виброударного воздействия.

В этом случае снижение уровня звука за время $\boldsymbol{\tau}$ определяется выражением:

$$\Delta L_m = V_z \tau, \qquad (5.14)$$

где: ΔL_m – снижение уровня звука, дБ; V_z – скорость затухания звука в материале, дБ/с; τ – характерное время затухания, с.

В работе выявлено, что если после удара звук затухает быстрее, то уменьшается длительность акустического воздействия на работника. Для операций с повторяющимися ударами это важно, так как суммарная акустическая нагрузка зависит и от максимального уровня шума, и от времени его сохранения.

Снижения риска через R_{va}, с учетом законов механики влияние материала можно выразить через снижение коэффициентов шумового и вибрационного воздействия:

$$K_v^{\text{после}} = K_v^{\text{до}}(1 - \lambda_v E_v), \qquad (5.15)$$

$$K_n^{\text{после}} = K_n^{\text{до}}(1 - \lambda_n E_n), \qquad (5.16)$$

где: $K_v^{\text{до}}$, $K_n^{\text{до}}$ – коэффициенты вибрационного и шумового воздействия до применения материала; $K_v^{\text{после}}$, $K_n^{\text{после}ft er}$ – коэффициенты после применения материала; λ_v, λ_n – коэффициенты реализации эффекта в конкретной конструкции; E_v – вибродемпфирующая эффективность материала; E_n – акустическая эффективность материала.

Вибродемпфирующую эффективность материала определяется через коэффициент потерь:

$$E_v = \frac{\eta_m - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}, \qquad (5.17)$$

а акустическую эффективность – через скорость затухания звука:

$$E_n = \frac{V_z \tau}{\Delta L_{\text{ц}}}, \qquad (5.18)$$

В работе отмечается, что эффективность вибродемпфирующих материалов в инженерной практике оценивается через их способность рассеивать механическую энергию колебаний. Здесь «основным параметром является коэффициент потерь η, который используется в стандартизированных методах испытаний вибродемпфирующих материалов. Так, ASTM E756 предусматривает определение коэффициента потерь, модуля Юнга или модуля сдвига материалов, применяемых для структурной вибрации, строительной акустики и контроля слышимого шума» [45]. В русскоязычной нормативной базе коэффициент потерь также рассматривается как характеристика вязкоупругих и демпфирующих материалов, отражающая отношение потерь энергии к запасаемой энергии при деформации.

Исходя из этого, эффект от виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов предлагается учитывать через снижение шумовой и вибрационной составляющих интегрального риска. Это отвечает физической сути демпфирования: материал воздействует прежде всего на передачу механических колебаний и структурного шума.

Тогда интегральный риск после применения материала определяется как:

$$R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n^{\text{до}}(1 - \lambda_n E_n) + w_2 K_v^{\text{до}}(1 - \lambda_v E_v) + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s. \qquad (5.19)$$

или в развернутом виде:

$$R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n \left(1 - \lambda_n \frac{V_z \tau}{\Delta L_{\text{ц}}}\right) + w_2 K_v \left(1 - \lambda_v \frac{\eta_m - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}\right) + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s \qquad (5.20)$$

при соблюдении следующих условий: $0 \le E_n \le 1$, $0 \le E_v \le 1$, $0 \le \lambda_n \le 1$, $0 \le \lambda_v \le 1$

Применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов для изготовления конструктивных частей оборудования обосновано законами механики виброударных процессов. При соударении деталей машин и механизмов энергия удара частично переходит в упругие колебания конструкции и структурный шум. Эти колебания распространяются по корпусам, рамам, опорам, кожухам и другим элементам оборудования, формируя виброакустическое воздействие на рабочих местах.

Снижение вибрации и шума, согласно закону сохранения энергии возможно за счет увеличения доли энергии, рассеиваемой в материале. Коэффициент потерь (η_m) характеризует способность материала преобразовывать механическую энергию колебаний во внутренние потери, тем самым уменьшая амплитуду и продолжительность виброударного отклика.

Скорость затухания звука V_z, выраженная в дБ/с, характеризует интенсивность ослабления акустического отклика после ударного воздействия.

В работе уточнено, что материалы с повышенным коэффициентом потерь и большей скоростью затухания звука позволяют уменьшить энергию, переходящую в вибрацию и структурный шум. Это приводит к снижению коэффициентов K_v и K_n в интегральной модели оценки виброакустического риска. Поэтому применение таких материалов в конструктивных частях оборудования является не только технически, но и механически обоснованным средством защиты работников от влияния виброакустических факторов.

Таким образом, с позиций механики эффективность виброакустодемпфирующих материалов объясняется тем, что они: уменьшают амплитуду колебаний после удара; увеличивают скорость затухания вибрации и звука; повышают долю рассеиваемой энергии; уменьшают структурный шум; снижают передачу вибрации на рабочие места; уменьшают интегральный показатель риска R_{va}. Именно это позволяет обоснованно включить такие материалы в систему инженерных средств защиты от виброакустических факторов на промышленных предприятиях.

Предложенный способ оценки эффективности виброакустодемпфирующих материалов через показатель R_{va} имеет практическое обоснование. В инженерной и нормативной практике характеристики виброакустодемпфирующих материалов оцениваются через коэффициент потерь, комплексный модуль упругости, динамические свойства и фактическое снижение шума и вибрации, и включение параметров E_n и E_v в интегральную модель риска является методически оправданным.

При этом показатель $\boldsymbol{R_{va}}$ следует рассматривать как адаптированную модель, предназначенную для оценки эффективности инженерных средств защиты в системе управления охраной труда. Ее преимущество заключается в том, что она связывает физические характеристики материала – коэффициент потерь, акустическое ослабление, толщину слоя и конструктивную реализацию – с управленческим показателем снижения профессионального риска на рабочих местах промышленных предприятий.

В СУОТ применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов относится к мерам инженерного уровня.

В иерархии мер управления риском такие решения стоят выше СИЗ, поскольку они снижают воздействие в источнике или на пути распространения вредного фактора. Это особенно важно для оборудования, где шум и вибрация заложены в самой технологии и организационными мерами полностью не устраняются.

На промышленных предприятиях Таджикистана виброакустодемпфирующие материалы на основе алюминиевых сплавов применимы на ряде объектов (таблица 5.12).

Таблица 5.11. – Применение виброакустодемпфирующих материалов на промышленных предприятиях

Объект применения	**Возможное конструктивное решение**	**Ожидаемый эффект**
Дробильные установки	Демпфирующие панели, виброизолирующие вставки, облицовка кожухов	Снижение структурного шума и вибрации корпуса
Вибрационные грохоты	Демпфирующие элементы на опорах и рамах	Ослабление передачи вибрации на площадки обслуживания
Компрессоры и насосы	Вибродемпфирующие прокладки и кожухи	Снижение вибрации основания и шума агрегата
Вентиляционные установки	Демпфирующие вставки в воздуховодах и корпусах	Уменьшение низкочастотного шума и вибрации
Прокатные станы	Демпфирующие панели и защитные ограждения	Ослабление вибрации металлических конструкций
Рольганги	Демпфирующие ролики	Сниижение шума и вибрации при транспортировке материала
Выбивные решетки	Амортизирующие основания и демпфирующие облицовки	Снижение ударного шума и вибрации
Пневмоинструмент	Демпфирующие рукоятки и вставки	Снижение локальной вибрации на руки работника

В системе управления охраной труда применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов следует рассматривать как мероприятие

инженерного уровня. По иерархии мер управления риском такие решения имеют более высокий приоритет по сравнению со средствами индивидуальной защиты, поскольку они направлены на снижение воздействия в источнике или на пути распространения вредного фактора.

Применение виброакустодемпфирующих материалов позволяет снизить коэффициент шумового воздействия K_n, коэффициент вибрационного воздействия K_v, а также частично коэффициент недостаточности средств защиты K_s, поскольку повышается уровень коллективной инженерной защиты рабочего места. В отдельных случаях за счет снижения динамических нагрузок может улучшаться и техническое состояние оборудования, что отражается на коэффициенте K_e.

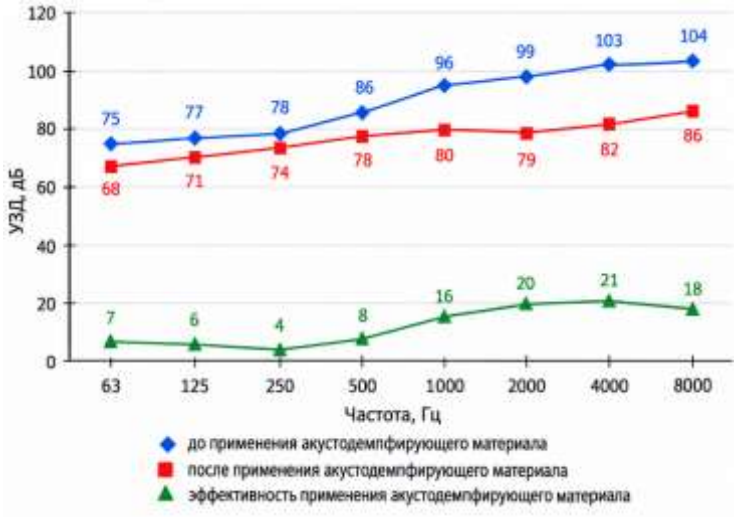


Рисунок 5.5. – Частотная зависимость уровня звукового давления конструкции ролика рольганга

После анализа результатов для определения эффективности исследуемых сплавов в качестве акустодемпфирующих материалов для снижения шума и вибрации испытали на роликах рольганга для транспортировки металлических изделий. Известно, что шум при транспортировке проката возникает при столкновении его с роликами рольганга и с учетом этого, измеряли звуковое давление в диапазоне частот 63–8000 Гц (рисунок 5.5).

Сравнительный анализ данных (рисунок 5.5), полученных при испытаниях, показал, что «конструкция ролика рольганга, изготовленной с применением акустодемпфирующего материала, обеспечивает снижение уровня шума в нормируемых частотах, предпочтительно на высоких частотах, на 16–21дБ, что характерно для рольгангов при транспортировке проката» [25–А].

С учетом специфики промышленных предприятий Таджикистана в работе особое внимание уделено применению виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов. Их применение позволяет снизить передачу вибрации от оборудования к рабочим площадкам, уменьшить структурный шум и повысить эффективность системы защиты работников от виброакустических факторов. Внедрение предложенной модели позволит достичь ряд результатов.

Во-первых, будет обеспечено более объективное ранжирование рабочих мест по уровню виброакустического риска, что позволит направлять ресурсы предприятия, в первую очередь, на наиболее опасные участки. Во-вторых, расчет интегрального показателя R_{va} позволит связать результаты измерений с управленческими решениями. Служба охраны труда сможет обосновывать необходимость установки шумозащитных кожухов, виброизолирующих оснований, акустических экранов и модернизации оборудования. В-третьих, учет технического состояния оборудования позволит связать охрану труда с системой технического обслуживания и ремонта. Это особенно важно для промышленных предприятий, где износ оборудования является одной из причин роста шума и вибрации. В-четвертых, повторная оценка риска после внедрения мероприятий позволяет определить фактическую эффективность защитных решений и исключить формальный подход к охране труда.

Таким образом, применение интегральной оценки виброакустического риска позволяет повысить объективность оценки условий труда, обеспечить обоснованное ранжирование рабочих мест по степени опасности и определить приоритетные направления защитных мероприятий. Учет технического состояния оборудования и повторная оценка риска после внедрения защитных решений обеспечат взаимосвязь охраны труда с системой технического обслуживания и ремонта, а также позволят оценить фактическую эффективность принятых мер. В целом предлагаемый подход будет способствовать совершенствованию системы управления профессиональными рисками, снижению воздействия шума и вибрации на работников и повышению безопасности производственных процессов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Промышленность является важнейшей отраслью национальной экономики Таджикистана и ключевым фактором решения социально-экономических задач страны. Безопасные и комфортные условия труда относятся к первостепенным задачам организации современного производства, поскольку от качества рабочей среды напрямую зависят производительность труда, травматизм и профессиональная заболеваемость [3-А, 6-А].

2. Виброакустические факторы (шум и вибрация) являются наиболее распространенными вредными производственными воздействиями. Они приводят к снижению профессиональной работоспособности сотрудников более чем на 50% (по данным исследований – до ≈ 53%). Длительное воздействие данных факторов приводит к развитию нейросенсорной тугоухости и других профессиональных патологий [7-А].

3. Эффективным средством защиты от виброакустических факторов являются виброакустодемпфирующие материалы, которые снижают шум и вибрацию непосредственно в источнике, то есть в виброударных процессах при соударении деталей машин и механизмов [15-А].

4. Виброакустическая обстановка на рабочих местах предприятий машиностроения, горнорудной и металлургической отраслей формируется преимущественно ударно-вибрационными процессами, сопровождающими работу технологического оборудования на разных стадиях обработки материалов [2-А].

5. Перспективными виброакустодемпфирующими материалами являются литейные сплавы систем Al–Si и Al–Si–Sr, деформируемые сплавы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–РЗМ, а также многослойные композиты на их основе. Выбор этих систем обусловлен их физико-химическими, механическими и технологическими свойствами, а также спецификой межкомпонентного взаимодействия [9-А].

6. Моделирование источников шума и способов возбуждения колебаний на основе законов подобия позволило разработать новые методики исследования демпфирующих свойств сплавов. Они адекватно воспроизводят соударение деталей и в этом превосходят традиционные методы измерений, не учитывающие виброударную природу факторов [7-А].

7. Виброакустодемпфирующие характеристики металлических систем определяются прежде всего химическим составом и концентрацией легирующих и модифицирующих элементов; существенный вклад вносят также режимы технологической и термической обработки [1-А].

8. Применение деформируемых сплавов Al–Zn–Mg в составе многослойных композитов повышает их диссипативную способность. Повышение вибродемпфирования обусловлено внутренним рассеянием энергии механических колебаний в слоях и на границах контакта за счет образования твердофазных соединений [9-А].

9. Обоснована необходимость перехода от традиционного контроля виброакустических факторов к риск-ориентированной модели, учитывающей параметры шума и вибрации, экспозицию, техническое состояние оборудования и фактическую эффективность средств индивидуальной и коллективной защиты [14-А].

10. Разработана алгоритмическая модель совершенствования системы управления охраной труда (СУОТ) на основе международного цикла PDCA. Она охватывает выявление источников факторов, инструментальный контроль, расчёт риска, ранжирование рабочих мест, выбор и внедрение защитных мероприятий с последующим аудитом.

11. Предложенная СУОТ с блоком количественной оценки виброакустического риска и инженерными средствами защиты на основе демпфирующих сплавов адаптирована к условиям предприятий Таджикистана. Она обеспечивает полный управленческий цикл: от определения политики и оценки рисков до планирования, мониторинга и непрерывного совершенствования условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Эмомали Рахмон. Об основных направлениях внутренней и внешней политики Республики Таджикистан // Послание Президента Республики Таджикистан Маджлиси Оли Республики Таджикистан от 26 декабря 2018 г. – Душанбе, 2018. – 44 с.

[2]. Эмомали Рахмон. Об основных направлениях внутренней и внешней политики Республики Таджикистан // Послание Президента Республики Таджикистан Маджлиси Оли Республики Таджикистан от 21 декабря 2021 г. – Душанбе, 2021. – 47 с.

[3]. Национальная стратегия развития Таджикистана на период до 2030 г. // Утверждено Постановлением Маджлиси намояндагон Маджлиси Оли Республики Таджикистан от 1 декабря 2016 г., №636. – Душанбе, 2016. – 86 с.

[4]. Программа ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 гг. // Утверждено Постановлением правительство Республики Таджикистан от 27 мая 2020 г., №293. – Душанбе, 2020 г. – 64 с.

[5]. Промышленность в странах Содружества Независимых Государств // Статистический сборник. – М.: Межгосударственный статистический комитет СНГ, 2025. – 337 с. – URL: https://new.cisstat.org/322 (дата обращения: 15.06.2025).

[6]. Статистический ежегодник Республики Таджикистан // Статистический сборник. – Душанбе, Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан, 2025. – 442 с.

[7]. Трудовой кодекс Республики Таджикистан // принят Законом от 23 июля 2016 года, № 1329 – Душанбе, 2016. – 88 с.

[8]. Хакдодов М.М. Металлическая композиция с демпфирующим слоем из сплавов, обладающих эффектом сверхпластичности // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: Сборник трудов международной конференции – М.: Знание, 2000 г.

[9]. Фавстов Ю.К. Шульга Ю.Н., Рахштадт А.Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 271 с.

[10]. В.В. Матвеев, Г.Я. Ярославский, Б.С. Чайковский и др. Сплавы высокого демпфирования на медной основе. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с.

[11]. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1979. – 352 с.

[12]. Яковлев А.П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – Киев.: Наукова думка, 1985. – 248 с.

[13]. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – Киев.: Изд. АН УССР, 1962. – 234 с.

[14]. А. Ф. Белова и Ф. И. Квасова и др. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 352 с.

[15]. Альтман М.Б., Андреева Г.Н., Арбузов Ю.П. и др. Применение алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия. 1985. 344 с.

[16]. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия. 1984. 528 с.

[17]. Белов С.В., Бринза В.Н., Векшин Б.С. и др. Безопасность производственных процессов. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

[18]. Заборов В.И., Клячко Л.Н., Росин Г.С. Защита от шума и вибрации в чёрной металлургии. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1988. – 216 с.

[19]. Дриц М. Е., Рохлин Л. Л., Рючина Г. В. Исследование демпфирующей способности магниевых сплавов систем Mg-Y и Mg-Y-Mn // Проблемы прочности. – 1972. – № 6. – С. 48–51.

[20]. Просвирин В.И., Маргунов Н.Н. – «Труды ЦНИИТмаш» М.: Машгиз, 1952, кн.: 49 – С. 37–40.

[21]. Службы по государственному надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Правительстве Республики Таджикистан // Информационный бюллетень – Душанбе, 2024 – 236 с.

[22]. Б.М. Злобинский, Н.И. Дрейман, Ю.А. Климов, Е.С. Пименов. Борьба с шумом в чёрной металлургии. – Киев: Техніка, 1973. – 200 с.

[23]. Кедрова Е. И. Модель виброакустической динамики подающих вальков приводных роликовых конвейеров. // Журнал Noise Theory and Practice. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 38–45.

[24]. Медведь Р. А., Соловьев Р. В. Производственный шум и борьба с ним. – Горький: Волго–Вятское книжное издательство, 1977. – 127 с.
[25]. Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др. Борьба с шумом на производстве. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
[26]. Хакдодов М.М. Устройство для исследования акустодемпфирующих свойств металлических материалов // Малый патент Республики Таджикистан № 0700158 от 11.12.2007. – Бюл. № 49 (1), 2008.
[27]. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
[28]. В.Н. Бринза, Ю.Л. Зарапин и др. Ролик рольганга, преимущественно прокатного стана: // А. с. 638392 СССР /– Опубл. 25.12.1978, Бюл. № 47.
[29]. Ролик рольганга: патент Украины № 95062854 / А.И. Буря, А.А. Буря, Н.Я. Попов и др. – Бюл. № 7, 2001.
[30]. Глинкин А.С. Моделирование шумообразования несущей системы рольганговых механизмов. Журнал Noise Theory and Practice. – Санкт-Петербург, 2022. С. 59–68.
[31]. А.И. Буря, А.А. Буря, Н.Я. Попов и др. Ролик рольганга // Патент Украины № 95062854 / – Бюл. № 7, 2001.
[32]. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
[33]. Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1971. – 190 с.
[34]. Курбанов Х.К., Хакдодов М.М., Курбанов Б. и др. Новый способ изготовления труб // Известия АН Таджикской ССР. – 1982. – № 4. – С. 103–108.
[35]. Способ изготовления изделий типа оболочек на стержневых заготовках и матрица для его осуществления: а. с. 1016011 СССР / М.М. Хакдодов и др. – Опубл. 07.05.1983, Бюл. № 17.
[36]. Курбанов Х.К., Хакдодов М.М., Рахматов С.Т. и др. Способ изготовления полых деталей с двойной стенкой // Известия АН Таджикской ССР. – 1986. – № 2. – С. 124–125.
[37]. Хакдодов М.М. Разработка акустодемпфирующих композиционных материалов: монография. – Душанбе, НПИЦентр, 2014. – 153 с.
[38]. ГОСТ Р ИСО 45001–2020. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2020. – 40 с.
[39]. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2020. – 20 с.
[40]. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. – 2nd ed. – Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2018. – 16 p.
[41]. Файнбург Г. З. Методы оценки профессионального риска и их практическое применение // Безопасность и охрана труда. – 2020. – № 2(83), – С. 25–41.
[42]. IEC 61882:2016. Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide. – 2nd ed. – Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission (IEC), 2016. – 124 p.
[43]. Головин С.А., Пушкар А.А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 190 с.
[44]. ASTM E756-05(2017). Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials. – West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017. – 14 p.
[45]. Об обеспечении санитарно-эпидемиологической безопасности населения: Закон Республики Таджикистан от 8 декабря 2003 года № 49 (с изменениями и дополнениями по состоянию на 22 июля 2013 года). – Душанбе, 2003.
[46]. Об охране окружающей среды: Закон Республики Таджикистан от 2 августа 2011 года № 760 (с изменениями и дополнениями). – Душанбе, 2011.
[47]. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Джураев Т.Дж. Стронций – эффективный модификатор силуминов. // Литейное производство. Москва, 2000. – № 5. – С. 28–29.
[48]. Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В. и др. Модифицирование силуминов стронцием. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.
[49]. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с участием бария и стронция. – Душанбе: Дониш, 1992. – 296 с.

[50]. Гохштейн М.Б., Васильева Л.С. О механизме модифицирования силуминов. – М.: Металловедение и термическая обработка металлов, 1970. № 7, – С. 42.
[51]. Фридляндер И.Н. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы. – М.: Оборонгиз, 1960. – 291 с.
[52]. Елагин В.И., Захаров В.В., Дриц А.М. Структура и свойства сплавов системы Al–Zn–Mg. М.: Металлургия, 1982. – 222 с.
[53]. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 41 p.
[54]. ILO–OSH 2001. Guidelines on occupational safety and health management systems. – Geneva: International Labour Office, 2001. – 27 p.
56. Brown S.M. Sound and Vibration, 1977, v. 11, №4, p.28-33.
57. Kaufman J.G., Material Design Engineering, 1962, v.56 N2, p. 104-105.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан

[1-А]. **Одиназода Б.Н. В**иброакустодемпфирующие свойства модифицированных литейных алюминиевых сплавов системы Ai-Si / Одиназода Б.Н., Хакдод М.М // Фуруги илм. Бахши "илмҳои табиӣ – риёзӣ" 2 (10). 2026, С. 20–27.
[2-А]. **Одиназода Б.Н.** Оценка виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий и причины их возникновения / Одиназода Б.Н. // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество №1 (13) 2026, – С. 65–71. ISSN 3105-7098.
[3-А]. **Одиназода Б.Н.** Современное состояние промышленности и улучшение условий охраны труда на предприятиях / Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М.// Вестник Технологического университет Таджикистана. – 2026. – №1 (64). – С. 57–65. – ISSN 2707-8000.
[4-А]. **Одиназода Б.Н.** Моделирование виброакустических процессов в рольганговых механизмах. / Одиназода Б.Н., Хакдодов М.М., Хакдод М.М. // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество №1 (13) 2026. – С. 11–16. ISSN 3105-7098.
[5-А]. **Одиназода Б.Н.** Об усовершенствовании методики исследования акустодемпфириющих свойств металлов и сплавов. / Одиназода Б.Н., Хакдодов М.М., Хакдод М.М. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования №4 (72) 2025, – С. 27–31. ISSN 2520–2227.
[6-А]. **Одиназода Б.Н.** Анализ условий труда и оценки виброакустических факторов в промышленности/ Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М., Хакдод М.М.// Вестник Технологического университет Таджикистана. – 2024. – №3 (58). – С. 67–74. – EDN JTBHNX.
[7-А]. Хакдод М.М. Моделирование процесса шумообразования при соударении деталей машин и методика исследования акустодемпфирующих свойств материалов. / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.,** Бозоров Ш.А. // Политехнический вестник. Серия: Металлургия и материаловедения. №2 (62), 2023. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. – С. 99-104, ISSN 2520-2227.
[8-А]. Хакдод М.М. Обеспечение экологической безопасности при воздействии виброакустических факторов на производстве. / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.** //Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ том 3, №2, – Душанбе: – 2023г. – С. 146-153. ISSN 2789–0953.
[9-А]. Хакдодов М.М. Влияние пластической деформации и термической обработки на акустодемпфирующие и механические свойства многокомпонентных алюминиевых сплавов. / Хакдодов М.М., **Одинаев Б.Н.,** Вазиров Н.Ш. // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе. ТТУ имени акад. М.С. Осими. 2008. – №2 (2). – С. 48-52.
[10-А]. **Одиназода Б.Н.** Методика расчета технологических и энергосиловых параметров при прокатке в скрещенных валках. /Одиназода Б.Н. // Политехнический вестник. Серия: Металлургия и материаловедения. №2 (62), 2023. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. – С. 95-98, ISSN 2520-2227.

[11-А]. Нажмудинов Ш.З. Исследование параметров перспективного гидромеханического привода горных машин с вращательным рабочим органом / Нажмудинов Ш.З., **Одиназода Б.Н.** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования №1 (69) 2025, ISSN 2520–2227. С. 79–83.
[12-А]. **Одиназода Б.Н.** Моделирование закономерностей изменения показателей процесса пластического течения металла при прокатке высоких полос в скрещенных валках / Одиназода Б.Н., Бозоров Ш. А., Саидов М.Х. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. Металлургия и материаловедения. №2 (50), 2020. – С. 131-139, ISSN 2520-2227.
[13-А]. Бозоров Ш. А. Вероятностная математическая модель поверхностного дефектообразования металла с учётом влияния факторов режима обжатий / Бозоров Ш. А., **Одиназода Б.Н.,** Саидаи Дж., Хакдод М.М., Саидов М.Х. // Вестник Педагогического университета Таджикистана. Серия естественных наук. №1–2 (5-6), 2020. – С. 120–127. ISSN 2219-5408.

2. Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций

[14-А]. **Одиназода Б.Н.** Совершенствование системы охраны труда и производственной безопасности на промышленных предприятиях. / Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М., Хакдод М.М. // Материалы II Международной научно–практической конференции «Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны». Душанбе: ТТУ имени академика М.С. Осими, 2025. – С. 328–335.
[15-А]. **Одиназода Б.Н.** Экспериментальная установка для исследования акустодемпфирующих свойств металлов и сплавов / Одиназода Б.Н., Хакдод М.М., Ибрахимов С.Ж. // Материалы II Международной научно–практической конференции «Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны» Душанбе: ТТУ имени академика М.С. Осими, 2025. – С. 346–351.
[16-А]. **Одиназода Б.Н.** Применение акустодемпфириющих материалов для защиты от виброакустических факторов на машиностроительных предпириятиях. / Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М., Хакдод М.М. // Материалы международной научно-практической конференции «Современные задачи машиностроительной промышленности». Душанбе: Издание ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2024. – С. 51–53.
[17-А]. Хакдод М.М. Теоретические основы обеспечения безопасности жизнедеятельности в промышленности / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.** // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Проблема совершенствования конструкции строительно-дорожных машин»**.** Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, Душанбе, 2024. – С. 234 – 240.
[18-А]. Хакдод М.М. Экологические аспекты использования алюминиевых сплавов в металлургии. / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.,** Бобозода С.О., Гардуллозода С. // Материалы Международной конференции ГИС в Центральной Азии – ГИСЦА «Геоинформационные науки для устойчивого развития» Душанбе, 2017. – С. 124–132.
[19-А]. Хакдодов М.М. Перспективы использования акустодемпфирующих материалов при решении задач материаловедения и инженерной акустики. / Хакдодов М.М., **Одинаев Б.Н.,** Гардуллозода С., Бобоев С.О. // Материалы VIII международной научно–практической конференции «Рациональное использование природных ресурсов и энергосбережение». Душанбе: ТУТ, 2015. – С. 52-58.
[20-А]. **Одинаев Б.Н.** Термоупругое деформирование слоистых композитных оболочек и пластин. / Одинаев Б.Н., Бобоев С.О., Бозоров Ш. А. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Наука и использование энергетического потенциала Таджикистана» Курган-Тюбе: Таджикский энергетический институт, 2013. – С. 123–128.
[21-А]. **Одинаев Б.Н.** Физико–химические акустодемпфирующих материалов на основе силуминов. / Одинаев Б.Н., Саидов Р.Х., Талбаков С.Г. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Энерго и ресурсосбережение при использовании природных в энергетике и промышленности». Курган-Тюбе: Таджикский энергетический институт, 2012. – С. 103–107.

[22-А]. **Одинаев Б.Н.** Кинетика изменения прочности сцепления и акустодемпфирующие свойства слоистых металлических композиций в зависимости от степени пластической деформации и температуры отжига. / Одинаев Б.Н., Бобоев С.О., Талбаков С.Г. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Наука и строительное образование на современном этапе». Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2011. – С. 127-131.
[23-А]. **Одинаев Б.Н.** Экспериментальные методы определения акустодемпфирующих характеристик металлических материалов. / Одинаев Б.Н., Абдуллоев С.С., Шарипов И.А. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Наука и энергетические образование на современном этапе». Курган-Тюбе: Таджикский энергетический институт, 2011. – С. 63–67.
[24-А]. Хакдодов М.М. Влияние вибрационной обработки расплава на акустодемпфирующие свойства модифицированных силуминов. / Хакдодов М.М., Махмадуллоев Х.А. **Одинаев Б.Н. //** Материалы республиканской научно–практической конференции «Методы повышения качество и целесообразности процессов производства». Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2011. – С. 192-196.
[25-А]. Хакдодов М.М. Физико-химические закономерности структурообразования в деформируемых алюминиевых сплавах /Хакдодов М.М., **Одинаев Б.Н.,** Бобоев С.О., Талбаков С.Г.// Материалы II международной научно–практической конференции. Чкаловск: Государственный металлургический институт Таджикистана, 2008. – С. 69-74.
[26-А]. **Одинаев Б.Н.** Влияние химических добавок на акустодемпфирующие свойства алюминиевых сплавов. / Одинаев Б.Н., Талбаков С.Г., Бобоев С.О. // Материалы II международной научно–практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2007. – С.51–54.
[27-А]. **Одинаев Б.Н.** Влияние легирующих составляющих на физико-химические и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов. / Одинаев Б.Н., Талбаков С.Г., Бобоев С.О. // Материалы Международной научно-практической конференции «Современная химическая наука и ее прикладные аспекты». Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2006. – С.105–110.

3. Монография

[28-А]. Хакдодов М.М. Акустодемпфирующие материалы из деформируемых алюминиевых сплавов. / Хакдодов М.М., **Одинаев Б.Н.**, Бобоев С.О. // Монография. Германия. LAP LAMBERT. 2012. – С. 144.

4. Изобритение по теме диссертации:

[29-А]. Хакдод М.М. Малый патент №TJ 1535, зарегистрировано 20.09.2024 г. Ролик рольганга / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.**
[30-А]. Хакдод М.М. Малый патент №TJ 1553, зарегистрировано 11.11.2024 г. Установка для исследования акустодемпфириющих свойств металлических материалов / Хакдод М.М., **Одиназода Б.Н.** Бозоров Ш.А.