НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИЯ
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

ДИССЕРТАЦИЯ

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

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАНТ
Хакдод Махмадшариф Махмуд

ДУШАНБЕ – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ТРУДА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ТАДЖИКИСТАНА 18
1.1 Современое состояние промышленности и проблемы обеспечения безопасности труда на рабочих местах 18
1.2. Основные требования и принципы охраны труда в производстве и защиты от виброакустических факторов 24
1.3. Оценка виброакустических факторов производственной среды и причины их возникновения 34
1.4. Методы и средства, для защиты работника от виброакустичеких факторов 46
1.5. Применение виброакустодемпфирующих материалов для снижения виброакустических факторов на промышленных предприятиях 54
1.5.1 Виброакустодемпфирующие свойства металлов и сплавов 54
1.5.2. Механизмы рассеивания энергии колебаний в виброакустодемпфирующих материалах 65
Выводы к первой главе 71
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ 73
2.1. Анализ условий труда и оценка виброакустических факторов на промышленных предприятиях 73
2.2. Основные источники формирования виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения 78
2.2.1. На предприятиях машиностроения при различных видах механической обработки материалов 78

2.2.2. Источники виброакустических факторов на предприятиях горнорудной промышленности 89
2.2.3. Источники формирования виброакустических факторов на предприятиях металлургической промышленности 91
2.3. Анализ условий труда и оценка виброакустических факторов на ОАО «ТАЛКО» 100
2.4. Моделирование процесса формирования виброакустических факторов ударно–вибрационного происхождения при транспортировке сырья и материалов на рольгангах 108
Выводы к второй главе 117
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОУДАРЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВИБРОАКУСТОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ 119
3.1. Выбор материалов для изучения виброакустических и демпфирующих свойств металлов и сплавов 119
3.2. Теоретические основы и механизмы звукоизлучения металлов и сплавов при механическом воздействии 124
3.3. Основные экспериментальные методы определения виброакустических и демпфирующих свойств конструкционных материалов 127
3.4. Моделирование процесса звукоизлучения при столкновениях деталей машин и разработка методологии изучения вибрационно-акустических демпфирующих свойств металлов и сплавов 131
3.5. Методики измерения и расчета виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий 143
Выводы к третьей главе 157

ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ И ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ 158
4.1. Анализ виброакустических и демпфирующих свойств литейных алюминиевых сплавов 158
4.1.1. Оценка влияния модифицирующих добавок на виброакустические характеристики алюминиево–кремниевых литейных сплавов 165
4.1.2. Влияние температуры и виды обработки расплавов на виброакустодемпфирующие свойства литейных алюминиевых сплавов 170
4.2. Анализ виброакустодемпфирующих свойств деформируемых алюминиевых сплавов 172
4.2.1. Влияния температуры на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов 182
4.2.2. Оценка влияния различных видов обработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов 183
4.3. Исследование виброакустодемпфирующих свойств композиционных материалов на основе деформируемых алюминиевых сплавов 186
Выводы к четвертый главе 193
ГЛАВА 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАБОЧИХ ОТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТАДЖИКИСТАНА 194
5.1. Действующая система управления охраной труда и ее применимость к промышленным предприятиям 194
5.2. Методологическое обоснование перехода от действующей СУОТ к риск–ориентированной модели управления виброакустическими факторами 197
5.3. Развитие методов оценки профессионального риска на промышленных предприятиях 203

5.4. Методический подход к оценке виброакустического риска на рабочих местах промышленных предприятий 211
5.5. Развитие средств защиты от виброакустического воздействия 222
5.6. Применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов в системе инженерных средств защиты 224
Выводы к пятой главе 245
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 248
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ 250
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЛИТЕРАТУРЫ 252
ПРИЛОЖЕНИЕ 282

ВВЕДЕНИЕ

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 Е.Я. Юдина [206], Г.Л. Осипова [171], С.В. Белова [25], В.Н. Бринзы [196], О.Н. Русака [24], В.И. Заборова [41], а также таджикских исследователей Х.К. Курбанова [266] и М.М. Хакдодова [11]. Существенный вклад в теорию рассеяния энергии при механических колебаниях внесли зарубежные специалисты С.М. Броун [44] и Ч.Г. Кауфман [45], а из российских учёных - Г.С. Писаренко [144], С.А. Головин [235], В.С. Постников [146] и другие. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов изучали Ю.К. Фавстов [74], Б.М. Злобинский [189], В.В. Матвеев [145], М.Е. Дриц [154], Л.Л. Рохлин [154], Е.Б. Утепов [56], А.В. Вахобов [94], Т.Дж. Джураев [89], М.М. Хакдодов [20], И.Т. Амонзода [215], Р.Х. Саидзода [214] 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:

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 305 страницах машинописного текста, включает 67 таблиц и 55 рисунков. Список использованной литературы содержит 301 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ТРУДА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ТАДЖИКИСТАНА

1.1 Современое состояние промышленности и проблемы обеспечения безопасности труда на рабочих местах

Промышленность - один из основных секторов экономики Таджикистана. Её основу составляют электроэнергетика, добыча полезных ископаемых, металлургия, лёгкая и пищевая промышленность, а также производство строительных материалов. В стране хорошо развиты гидроэнергетика, добыча угля, серебра, золота и других полезных ископаемых. Важную роль играют предприятия по переработке хлопка, выпуску текстиля, продуктов питания и цемента. Развитие промышленности создаёт новые рабочие места, увеличивает экспорт и укрепляет экономику страны.

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.

За годы независимости структура отрасли заметно изменилась. Устаревшие фонды и энергоёмкие технологии советского периода постепенно уступают место современным производственным процессам. Новые линии ориентированы на глубокую переработку местного сырья и импортозамещение.

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.

Динамика ключевых показателей развития промышленности за 2018–2024 годы приведена в таблице 1.1. Доля промышленного сектора в валовом внутреннем продукте за этот период в среднем составляла 21,7% [6]. Перечень ведущих промышленных предприятий Республики Таджикистан приведён в приложении 3.

Таблица 1.1. – Основные показатели развития промышленности в Республике Таджикистан в период 2018–2024 гг.

Показатели	Годы							Темпы роста 2024/2018 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, % к предыдущему году	110,6	113,2	108,8	120,8	109,7	109,0	120,0	1,08
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

Составлено автором на основе данных Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан за 2018–2024 годы.

По данным таблицы 1.1, в 2018–2024 годах промышленность Таджикистана устойчиво росла. 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%. В целом за рассматриваемый период расширялось производство, росло число предприятий и постепенно увеличивалась занятость в промышленном секторе.

Индустриализация Таджикистана опирается на внедрение новых технологий в энергетике, металлургии и машиностроении. Стратегический курс направлен на создание высокотехнологичной промышленной базы и постепенное увеличение её доли в структуре ВВП страны.

По данным Статистического комитета СНГ, в 2025 году Республика Таджикистан заняла первое место среди стран Содружества по темпам роста промышленного производства. Общий объём промышленной продукции достиг 66,7 млрд сомони, что на 13,3 млрд сомони больше показателя 2024 года. Годовой темп прироста промышленного сектора составил 22,0% [5].

В отраслевой структуре промышленности республики за 2025 год первое место занимает горнорудный сектор (40,3%). Значительная доля приходится на пищевую промышленность (18,6%), электроэнергетику (17,2%), машиностроение (7,9%), производство строительных материалов (6,2%) и другие отрасли.

Большая часть объёма производства формируется предприятиями горнодобывающей отрасли, металлургического комплекса, а также машиностроения и металлообработки (таблица 1.2).

Таблица 1.2. – Объём промышленной продукции по основным отраслям промышленности (в ценах соответствующих лет, 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

Составлено автором по данным Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан за 2018–2024 гг.

Рост промышленного производства в 2018–2024 годах обусловлен расширением производственной базы: увеличилось количество предприятий и выросла численность промышленно-производственного персонала.

Таблица 1.3. – Динамика численности промышленно–производственного персонала в Таджикистане за 2018–2024 гг.

Год	Среднегодовая численность промышленно-производственного персонала, тыс. чел.	Из них рабочих, тыс. чел.	Доля рабочих в общей численности персонала, % *
2018	85,6	72,1	84,2%
2019	84,2	73,2	86,9%
2020	84,3	67,7	80,3%
2021	85,3	68,3	80,1%
2022	86,3	71,2	82,5%
2023	87,5	72,2	82,5%

Составлено автором на основе данных Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан за 2018–2024 годы.

Высокая динамика не отменяет ряда нерешённых задач, сдерживающих ускоренную индустриализацию экономики страны. К ключевым проблемам отечественного промышленного сектора относятся:

«– физический и моральный износ основных производственных фондов;

– научно-технологическое отставание;

– зависимость от внешних рынков вследствие незавершенности технологических циклов;

– неполное использование потенциала высококвалифицированных кадров;

– высокая стоимость энергетических ресурсов;

– дефицит инвестиционных вложений;

– недостаточное финансирование научных исследований для инновационного развития отрасли;

– высокий уровень бюрократических барьеров» [7].

Для устранения перечисленных ограничений требуются новые подходы к развитию предприятий, основанные на принципах экономики знаний и на организационно-экономических инструментах использования природно-ресурсного потенциала страны [8].

Наряду с экономическими задачами большое значение имеет обеспечение безопасности труда. Создание безопасных и комфортных условий работы - одно из основных требований к организации современного производства. От состояния производственной среды напрямую зависят производительность труда, уровень травматизма и профессиональная заболеваемость [9].

Виброакустические факторы (шум и вибрация) относятся к самым распространённым вредным и опасным производственным факторам на промышленных предприятиях. Их воздействию подвергается каждый третий работник [12, 13]. Широкая эксплуатация технологического оборудования создаёт повышенные уровни шума и вибрации, которые негативно сказываются на здоровье персонала [13, 14]. Превышение допустимых норм виброакустического

воздействия в сочетании с высокой тяжестью трудового процесса приводит к росту производственного травматизма и профессиональной заболеваемости (таблица 1.4) [12–14].

Таблица 1.4. - Причины производственного травматизма и динамика численности работников, занятых во вредных и опасных условиях труда на промышленных предприятиях Республики Таджикистан за 2018–2024 гг.

Причины производственного травматизма	Годы						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Условия труда, не отвечающие санитарно-гигиеническим нормам	3380	4356	4891	4588	4501	2252	4278
Выполнение работ в условиях высокой тяжести трудового процесса (тяжелый физический труд)	2758	1016	1602	737	1454	649	984
Воздействие повышенных уровней производственного шума	933	1015	1267	1102	1367	634	1088
Воздействие повышенных уровней производственной вибрации	491	425	702	561	705	485	373
Запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны выше предельно допустимых концентраций (ПДК)	1109	1034	1159	728	1190	260	926
Эксплуатация оборудования, не отвечающего требованиям безопасности	589	10	62	6	16	2	–

По данным таблицы 1.4, в 2024 году из 4278 человек, занятых во вредных условиях труда, 1461 работник подвергался воздействию повышенных уровней шума и вибрации - это примерно 34,1%. Полностью локализовать или устранить эти факторы в реальном производстве сложно, поскольку они неразрывно связаны с самими технологическими процессами. Проблема актуальна не только для Таджикистана, но и для других промышленно развитых стран [15–19]. Поэтому необходим постоянный мониторинг виброакустических параметров и своевременное внедрение технических и организационных мер защиты.

Более трети рабочих мест с неблагоприятными условиями труда в республике отличаются повышенными уровнями шума и вибрации. Обеспечение виброакустической безопасности снижает риск профессиональных заболеваний и

повышает производительность труда в обрабатывающей промышленности [20]. Для улучшения условий труда необходимо разрабатывать отраслевые системы управления охраной труда (СУОТ), которые соответствуют международным стандартам и учитывают особенности конкретных производственных объектов.

1.2. Основные требования и принципы охраны труда в производстве и защиты 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.

Безопасность человека «в процессе трудовой деятельности с позиций правовой, организационной и технической защиты на основе анализа опасных и вредных факторов, формируемых техническими системами и средствами производственной среды в различных отраслях промышленности, рассмотрены в работах» [21–25].

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. «Международной организацией труда в рамках сотрудничества с органами государственной власти Республики Таджикистан с участием социальных партнёров и соответствующих научных организаций при финансовой поддержке Проекта технического сотрудничества МОТ и Республики Корея „Повышение качества систем управления охраной труда в странах Центральной Азии“ был подготовлен Национальный обзор по охране труда в Республике Таджикистан» [26].

Обеспечение конституционного права граждан на безопасный труд относится к основным направлениям государственной социальной политики.

Конституция Республики Таджикистан гарантирует каждому гражданину право:

«– на охрану труда. При этом запрещается использование труда женщин и несовершеннолетних на тяжелых и подземных работах, а также работах с вредными условиями труда (ст.35);

– на отдых. Это право обеспечивается путем установления продолжительности рабочего дня и путем предоставления ежегодного отпуска, еженедельных дней отдыха и иными условиями, предусмотренными законами (ст.37);

– на охрану здоровья. Государство принимает меры по оздоровлению окружающей среды, развитию массового спорта, физической культуры и туризма (ст.38);

– социальное обеспечение в старости, в случае болезни, инвалидности, утраты трудоспособности, потери кормильца и в других случаях, определенных законом (ст.39)» [27].

Создание благоприятных условий труда и здоровой рабочей атмосферы важно для каждого работника, поскольку на работе проходит треть жизни человека.

В годы Государственной независимости Правительство Республики Таджикистан осуществило ряд мер, которые стали основой для развития законодательства об охране труда работников всех отраслей экономики. На первом этапе были пересмотрены нормативные правовые акты Союза Советских Социалистических Республик и Таджикской ССР по вопросам охраны труда, действовавшие к моменту обретения независимости.

Государственный надзор за охраной труда регламентируется Трудовым кодексом Республики Таджикистан [28].

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».

Реальную картину охраны труда и условий труда в организациях и на предприятиях различных форм собственности отражают, как известно, статистические данные о несчастных случаях на производстве и профессиональных заболеваниях. Однако сегодня эти показатели не являются достаточно точными. Действующий порядок расследования и регистрации несчастных случаев на производстве был принят ещё в советский период и не соответствует современным требованиям.

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».

Основными задачами Программы являются:

«– совершенствование законодательства в области охраны труда;

– внедрение 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;

– формирование механизма экономического стимулирования предприятий, организаций и заведений в улучшения условий труда» [26].

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 [28].

Среди принципов охраны и защиты труда Кодекс выделяет следующие:

«– создание условий труда, отвечающих требованиям безопасности и гигиены;

– право работника на информацию об охране труда;

– ответственность работодателя за нарушение требований об охране труда;

– ограничения на тяжелые работы и работы с вредными или опасными условиями труда;

– гарантии права работника на охрану труда;

– обучение и инструктирование работников по вопросам охраны труда;

– разработка и внедрение инструкций по охране труда, обязательных для работников;

– обеспечение контроля за соблюдением правил, инструкций по охране труда;

– обязательный учет и расследование несчастных случаев на производстве;

– бесплатное обеспечение работников специальной одеждой и обувью, другими средствами индивидуальной защиты, лечебно–профилактическим питанием и другими средствами;

– возмещение ущерба в связи с повреждением здоровья или смертью работника;

– обеспечение эффективного контроля за использованием труда женщин, молодежи, инвалидов» [28].

Трудовой кодекс и смежные нормативные документы определяют, какие профессии относятся к потенциально вредным условиям труда.

Законодательство об охране труда дополняют постановления Правительства Республики Таджикистан (ПП РТ), среди них:

– Типовая форма трудового договора (ПП РТ от 07.09.2019 г. № 457);

– Меры по снижению неформальной занятости на 2019–2023 годы (ПП РТ от 30.08.2019 г. № 439);

– Коэффициенты за работу в особых условиях (ПП РТ от 03.05.2014 г. № 303 с изменениями от 03.03.2017 г. № 111 и 01.08.2018 г. № 382);

– Предоставление отпусков за продолжительный стаж (ПП РТ от 27.04.2018 г. № 197);

– Программа по искоренению наихудших форм детского труда на 2015–2020 годы (ПП РТ от 31.10.2014 г. № 690);

– Порядок заключения трудовых соглашений (ПП РТ от 02.07.2008 г. № 307 с изменениями от 02.05.2019 г. № 232);

– Ограничения на применение труда женщин и нормы переноса тяжестей (ПП РТ от 04.04.2017 г. № 179).

Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 27 августа 2020 года № 458 утверждён «Порядок определения повышенной оплаты труда за тяжёлые работы, работы с вредными и (или) опасными и иными особыми условиями труда». Условия труда там разбиты по вредности и опасности на четыре класса (таблица 1.5).

Правовую и нормативно-техническую основу охраны здоровья на рабочих местах формируют законодательные акты и системы стандартов. «Стандарты подразделяются на государственные, территориальные, отраслевые и стандарты организации. Они учитывают требования, предъявляемые к средствам производства, транспортным средствам, производственным (технологическим) процессам, сырью, материалам, производственной среде, а также к средствам индивидуальной и коллективной защиты работающих» [26].

Таблица 1.5. – Классификация условий труда по степени вредности и опасности в Таджикистане

Класс условий труда	Условия труда	Состояние условий труда
I	Оптимальные условия труда	Воздействие на работника вредных производственных факторов не превышает установленные нормы
II	Допустимые условия труда	Воздействия на организм, но функциональное состояние организма работника восстанавливается во время регламентированного отдыха или к началу следующей смены
III	Вредные условия труда	Уровень воздействия производственных факторов превышает норму, и есть риск получить профзаболевание
IV	Опасные условия труда	Работник подвергается воздействию вредных производственных факторов, уровень воздействия которых может представлять угрозу для жизни работника

В таблице отражены степень безопасности и величина воздействия производственных факторов на работника. Условия труда разделены на четыре класса, от наиболее благоприятных до опасных. С переходом от I класса к IV возрастает риск для здоровья и жизни работника. Поэтому основная задача охраны труда состоит в том, чтобы обеспечить оптимальные или допустимые условия и максимально снизить воздействие вредных и опасных факторов.

Назначение, структуру, содержание системы и порядок согласования стандартов определяет ГОСТ 12.0.001-2013 «Система стандартов безопасности труда. Основные положения» (пришедший на смену ГОСТ 12.0.001-82). Требования к обеспечению безопасности, сохранению здоровья и работоспособности персонала регламентирует «Система стандартов безопасности труда» (ССБТ), то есть комплекс взаимосвязанных нормативно-технических документов.

Обозначение государственных стандартов ССБТ построено на пяти шифровых группах (классификационных подсистемах) (рисунок 1.1):



Рисунок 1.1. – Система стандартов безопасности труда

На рисунке показана структура обозначения государственного стандарта ГОСТ 12 в рамках Системы стандартов безопасности труда (ССБТ).

Обозначение стандарта состоит из нескольких частей:

ГОСТ – обозначает государственный стандарт.

12 – регистрационный номер комплекса стандартов ССБТ (Система стандартов безопасности труда).

Первая цифра в скобках (Х) – указывает группу (подсистему) стандарта. Для ССБТ предусмотрены группы от 0 до 4.

Следующие цифры (ХХХ) – это порядковый номер стандарта внутри соответствующей группы.

Последние две цифры (ХХ) – обозначают год утверждения стандарта.

Условное обозначение ГОСТ 12.(Х).(ХХХ)–(ХХ) позволяет определить, что это государственный стандарт из комплекса ССБТ, а также идентифицировать его группу, порядковый номер и год утверждения.

Зная этот шифр, нужный стандарт по безопасности труда легко найти в перечне.

Всего в ССБТ пять подсистем, каждая со своим кодом (таблица 1.6).

Таблица 1.6. – Стандарты, подсистемы и их содержание

Шифр	Группа стандарта (подсистема)	Содержание подсистемы
0	Организационно–методические стандарты	Общие положения ССБТ – цели, задачи и структуру системы, порядок внедрения и контроля стандартов, терминологию, а также классификацию опасных и вредных производственных факторов. Требования к организации работ – правила обучения и аттестации персонала по безопасности труда, методики оценки условий и состояния охраны труда на предприятии.
1	Стандарты требований и норм по видам опасных и вредных производственных факторов	Требования по видам опасных и вредных производственных факторов, предельно допустимые значения их параметров и характеристик; методы контроля нормируемых параметров и характеристик опасных и вредных производственных факторов; методы защиты работающих от опасных и вредных производственных факторов
2	Стандарты требований безопасности к производственному оборудованию	Общие требования безопасности к производственному оборудованию; требования безопасности к отдельным группам (видам) производственного оборудования; методы контроля выполнения требований безопасности
3	Стандарты требований безопасности к производственным процессам	Общие требования безопасности к производственным процессам; требования безопасности к отдельным группам (видам) технологических процессов; методы контроля выполнения требований безопасности
4	Стандарты требований к средствам защиты работающих	Требования к отдельным классам, видам и типам средств защиты; методы контроля и оценки средств защиты; классификация средств защиты

Соглашением глав государств СНГ от 9 декабря 1994 года в Республике Таджикистан закреплено применение стандартов ГОСТ, СНиП и СанПиН бывшего СССР и Российской Федерации.

Разработкой государственных стандартов и норм занимается Агентство по стандартизации, метрологии, сертификации и торговой инспекции при Правительстве Республики Таджикистан (на основании Положения от 28 декабря 2006 года).

Чем теснее Таджикистан связан с мировой экономикой, тем больше приходится сверять национальные нормы с международными стандартами по управлению охраной труда – серией ISO 18000, а теперь ISO 45001.

На предприятиях охрану труда регулируют Трудовой кодекс Республики Таджикистан, Закон «Об охране труда» (от 19 мая 2009 года, № 517) и связанные с ними акты.

В этих документах записано, что обязан делать работодатель и что работник, какие гарантии безопасного труда даёт государство и откуда берутся деньги на охрану труда. Основные нормативные документы перечислены в приложении 4.

В соответствии со статьей 8 закона Республики Таджикистан «Об охране труда» (19 мая 2009 года, № 517) работодатель:

«– организует надзор за здоровыми и безопасными условиями труда, опасными и вредными производственными факторами, регулярно и своевременно информирует работников об изменениях в этой области;

– разрабатывает и осуществляет перспективные и годовые планы мероприятий, направленные на улучшение условий труда, обеспечение охраны труда и сохранение здоровья работников;

– всячески поощряет и содействует развитию эффективного сотрудничества между работодателем и работниками по обеспечению здоровых и безопасных условий труда;

– в производствах с вредными и опасными условиями труда, а также на работах, проводимых в особых температурных условиях или связанных с загрязнениями, выдает работникам в соответствии с установленными нормами бесплатно специальную одежду, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты (СИЗ), моющие и дезинфицирующие материалы;

– ежегодно выделяет необходимые, а в зависимости от состояния условий труда, уровня травматизма и профессиональной заболеваемости, средства и материальные ресурсы на мероприятия по обеспечению безопасных и здоровых условий труда. Расходование этих средств и материалов на другие цели не допускается;

– на каждом производственном участке создает санитарные посты (аптечки), укомплектованные необходимыми средствами для оказания первой медицинской помощи;

– организует за счет своих средств медицинское и лечебно–профилактическое обслуживание работников и т.д.;

– предоставляет компенсации за работу во вредных условиях труда (повышение заработной платы, дополнительный отпуск, сокращенный рабочий день) и осуществляет другие расходы, связанные с гарантией безопасности здоровья работников (перевод на другую легкую работу, отказ работника от работы в условиях труда, несоответствующих нормам и требованиям охраны труда и др.)» [9].

Основными принципами и направлениями государственной политики в области охраны труда в соответствии с трудовым законодательством являются:

«– признание и обеспечение приоритета жизни и здоровья работников по отношению к результатам деятельности организаций;

– установление и обеспечение гарантий прав работников на охрану труда;

– государственное управление охраной труда;

– участие государства в финансировании охраны труда;

– государственный надзор и контроль за соблюдением законодательства Республики Таджикистан по охране труда;

– обеспечение государством сотрудничества между работодателем и работником и (или) их представителей в организациях по вопросам охраны труда;

– разработка и установление единых нормативных требований по охране труда;

– проведение эффективной налоговой политики, стимулирующей создание здоровых и безопасных условий труда, разработка и внедрение безопасной техники и технологий, стимулирование производства средств индивидуальной и коллективной защиты работников;

– привлечение к ответственности работодателей и должностных лиц за нарушение требований по охране труда;

– установление порядка и контроль обязательного расследования каждого несчастного случая на производстве и профессионального заболевания; становление льгот и компенсаций за работу во вредных и опасных условиях труда;

– обеспечение социальной защиты работников, полное возмещение вреда лицам, пострадавшим от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

– установление системы показателей условий и охраны труда, государственной статистической отчетности по этим вопросам, а также о несчастных случаях на производстве и профессиональных заболеваниях;

– международное сотрудничество в области охраны труда, обеспечение международных соглашений по вопросам охраны труда» [28].

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.

Шум, инфразвук, ультразвук и вибрация имеют единую физическую природу: все они являются проявлениями одной механической колебательной системы [29] (рисунок 1.2).

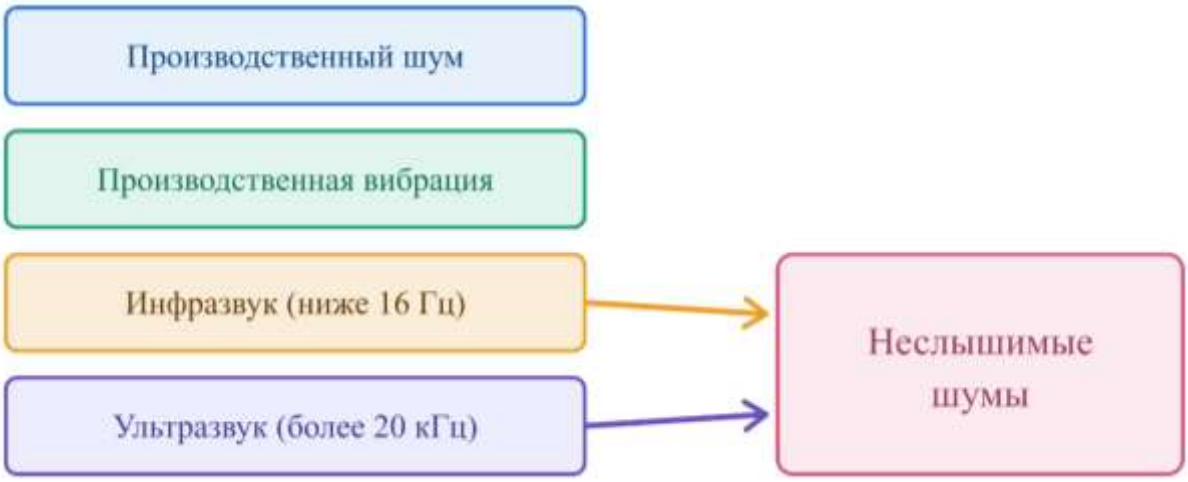


Рисунок 1.2. – Система виброакустических факторов

На объектах горнодобывающей, металлургической, машиностроительной промышленности и транспорта виброакустические факторы распространены повсеместно [30].

Анализ условий труда указывает на то, что на промышленный сектор приходится более 54,0% рабочих мест с неблагоприятными условиями. При этом около 42,0% из них обусловлены негативным воздействием шума и вибрации [31].

Длительное превышение гигиенических норм виброакустического воздействия приводит к поражениям органов слуха, опорно-двигательного аппарата и сердечно-сосудистой системы. Этот фактор снижает профессиональную трудоспособность рабочих в мире более чем на [32] и способствует развитию профессиональной нейросенсорной тугоухости [33].

Шум и вибрацию на рабочем месте оценивают сразу по двум группам показателей – физическим и гигиеническим.

Производственный шум. Это беспорядочная смесь звуков разной силы и частоты. Физик скажет, что звук – колебания частиц упругой среды, газа, жидкости или твёрдого тела. Для физиолога шум – прежде всего то, что слышит ухо, когда до него доходят звуковые волны в диапазоне от до .

Шум, как и прочие вредные факторы, описывают тремя показателями:

– частоте колебаний (числу колебаний в единицу времени);

– интенсивности звука (отношению энергии звуковой волны к единице времени);

– звуковому давлению — разности между атмосферным давлением и давлением в возмущённой среде.

Как звуковое давление возникает и уходит в окружающее пространство, видно на рисунке 1.3.

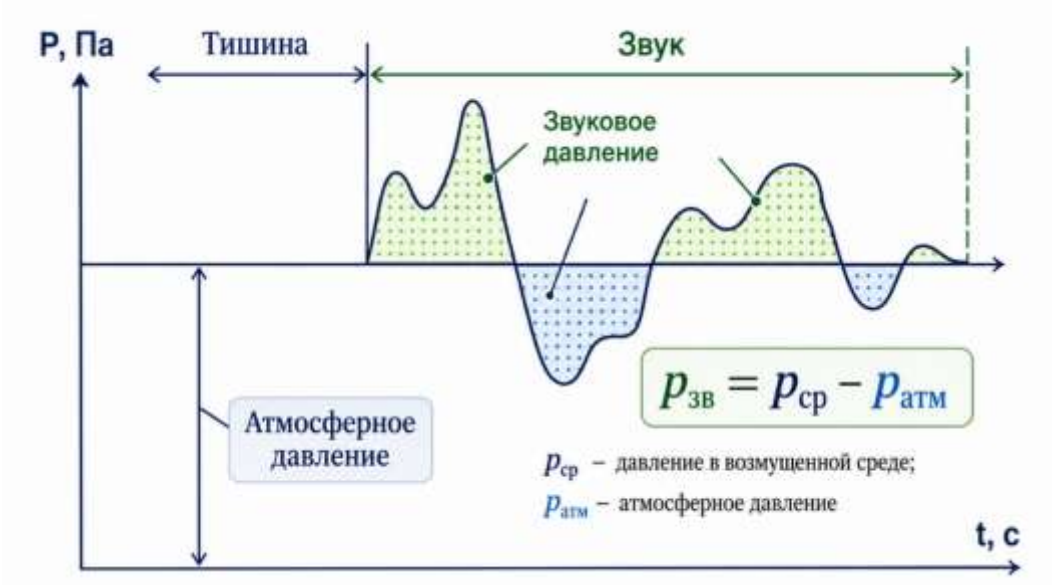


Рисунок 1.3. – Схема образования и распространения звукового давления

Когда звуковая волна проходит через среду, её частицы колеблются, и возникает переменное звуковое давление p. Волна несёт энергию; поток этой энергии через единицу площади называют интенсивностью звука I:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \qquad (1.1)$$

где I – интенсивность звука, Вт/м²; p – среднее квадратическое значение звукового давления, Па; ρ – плотность среды, кг/м³; c – скорость распространения звука в среде, м/с.

Нижняя граница слуха – порог слышимости (рисунок 1.4): наименьшие давление p_0 и интенсивность I_0, которые ухо ещё различает на частоте 1000 Гц). Верхняя граница – болевой порог. Всё, что мы слышим, лежит между ними.

Человеческий слух устроен нелинейно. Из-за этой особенности абсолютные цифры давления и интенсивности плохо передают, насколько сильно шум на самом деле действует на нас. На производстве пошли другим путём: для оценки используют логарифмические шкалы, привязанные к порогу слышимости.

Единицей измерения здесь выступают децибелы (дБ), а весь наш рабочий диапазон восприятия укладывается в пределы от 0 до 140 дБ (рисунок 1.4).

«Уровни интенсивности звука L_I и звукового давления L выражаются в децибелах (дБ) и рассчитываются по следующим формулам:

– уровень интенсивности звука:

$$L_I = 10 \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad (1.2)$$

– уровень звукового давления:

$$L = 20 \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad (1.3)$$

где I – интенсивность звука в данной точке, Вт/м²; p – среднее квадратическое значение звукового давления, Па; $I_0 = 10^{-12}$Вт/м^2 и $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – опорные пороговые значения интенсивности и звукового давления на частоте 1000 Гц» [23].

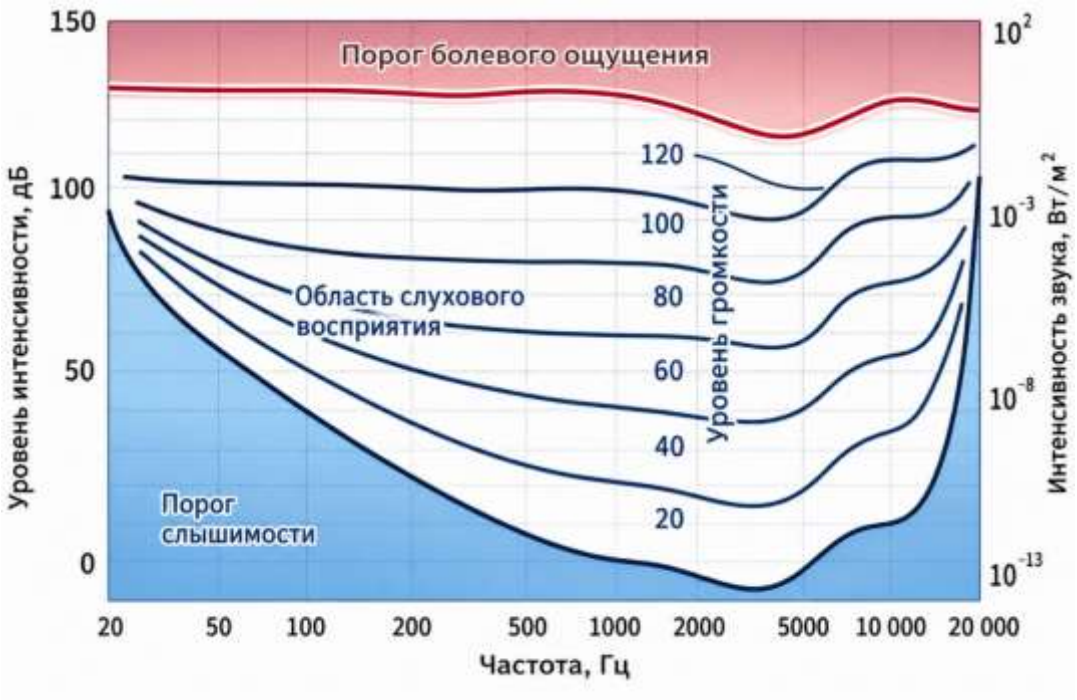


Рисунок 1.4. – Диаграмма слухового восприятия звука человеком

Если параметры воздуха на рабочем месте отличаются от стандартных, уровень звукового давления L и уровень интенсивности L_I связаны так [26]:

$$L = L_I + 10\lg\left(\frac{\rho c}{\rho_0 c_0}\right) \qquad (1.4)$$

где ρ_0 и c_0 – плотность воздушной среды ($\rho_0 = 1{,}204$ кг/м^3) и скорость распространения звуковой волны ($c_0 = 343$ м/с) при нормальных атмосферных условиях (температура $T = 20\,^{\circ}$C, барометрическое давление $P = 101{,}325$ кПа);

ρ и c – те же величины, измеренные прямо на рабочем месте. При нормальных условиях акустическое сопротивление воздуха равно $\rho_0 c_0 \approx 413$ Па · с/м, второе слагаемое обращается в ноль, и на практике $L \approx L_I$.

Интенсивность звука L_I и её уровень нужны прежде всего инженеру: по ним считают энергию звукового поля, звукоизоляцию стен и перегородок, звуковую мощность машин. Гигиениста же интересует уровень звукового давления L – именно по нему нормируют шум, потому что он лучше отражает нагрузку на слух и нервную систему.

Одного общего уровня для оценки мало, нужен ещё частотный спектр. Ухо острее всего слышит в полосе $1000 - 4000$ Гц, и два звука с равным давлением, но разной высоты кажутся нам неодинаково громкими. Поэтому при гигиенической оценке пользуются шкалой A, близкой к чувствительности уха при средней громкости; на выходе получают один показатель – эквивалентный уровень звука в дБА.

Опаснее всего для слуха высокочастотный шум. При одинаковом уровне он утомляет быстрее низкочастотного, сильнее раздражает и сильнее повреждает внутреннее ухо – это учтено и в санитарных нормах.

Обследования предприятий раз за разом показывают одно и то же: «…среди комплексного воздействия вредных факторов преобладают виброакустические нагрузки, включающие производственный шум и вибрацию» [31].

В таблице 1.7 шум разделён на виды по частоте, спектру и поведению во времени.

Таблица 1.7 – Классификация и основные характеристики производственного шума

Классификационный признак	Вид (тип) шума	Физико-акустическая характеристика
Спектральный состав (частотный диапазон)	Низкочастотный •	Преобладание максимальных уровней звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами до 300 Гц включительно. .
	Среднечастотный	Преобладание уровней в диапазоне от 300 до 800 Гц
	Высокочастотный	Преобладание уровней в диапазоне свыше 800 Гц.
Характер спектра	Широкополосный	Сплошной спектр шириной более одной октавы без выраженных дискретных частот.
	Тональный	Наличие в спектре выраженных дискретных тонов (превышение уровня в одной третьоктавной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ).
Временны́е характеристики	Постоянный	Уровень звука за 8-часовой рабочий день (смену) изменяется во времени не более чем на 5 дБА при измерениях на временной характеристике «Медленно» (Slow).
	Непостоянный:	Уровень звука за смену изменяется более чем на 5 дБА:
	– колеблющийся во времени	– уровень непрерывно изменяется во времени;
	– прерывистый;	– уровень ступенчато изменяется (на 5 дБА и более), причем длительность интервалов сохранения постоянного уровня составляет от 1с и более;
	– импульсный.	– состоит из одного или нескольких звуковых сигналов длительностью менее 1с.

Нормирование производственного шума. Санитарные нормы ограничивают шум на рабочем месте предельно допустимыми уровнями (ПДУ) – звукового давления по полосам и общего уровня звука. Подходы к нормированию собраны в таблице 1.8. Для оценки по предельному спектру шумомер переключают в режим «S» («Медленно»).

Таблица 1.8 – Методы гигиенического нормирования производственного шума

Метод нормирования	Характеристика нормируемого фактора	Нормируемые параметры и их единицы измерения
Предельный спектр	Постоянный шум	Предельно допустимые уровни (ПДУ) звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, дБ
Интегральный уровень (с учетом временных характеристик)	Непостоянный шум (колеблющийся, прерывистый, импульсный)	Эквивалентный по энергии уровень звука $L_{Aeq,T}$ за 8-часовую рабочую смену, дБА

Эквивалентный уровень звука (дБА) измеряют по характеристике «А» и приводят к восьмичасовой смене.

Физические и гигиенические оценки инфразвука и ультразвука. Обе эти области лежат за пределами слышимого диапазона – инфразвук ниже, ультразвук выше, – однако на организм они действуют.

Инфразвук благодаря длинной волне слабо затухает в воздухе [34] и плохо задерживается звукоизоляцией. При уровнях 110–150 дБ нарушается работа вестибулярного аппарата, нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем, поэтому при превышении ПДУ работникам предоставляют 20-минутный перерыв каждые два часа.

Ультразвук высокой интенсивности вызывает функциональные нарушения нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем.

Если человек регулярно контактирует с ультразвуком, у него со временем развивается профессиональное заболевание, такие как вегетативно-сенсорная полинейропатия верхних конечностей [30]. Исследователи отмечают, что такой

контакт часто сопровождается онемением кистей и предплечий, а в части случаев доходит и до выраженного болевого синдрома [35].

Производственный инфразвук создают главным образом компрессорные и насосные станции, авиационные двигатели, энергетические турбины и крупногабаритные металлургические агрегаты.

Ультразвук широко применяют в промышленности и медицине. На производстве вредное ультразвуковое воздействие связано с технологическими процессами очистки, дезинфекции, ультразвуковой сварки, пайки, а также механической и термической обработки материалов. В здравоохранении аналогичную физическую нагрузку на персонал создаёт эксплуатация медицинского диагностического и терапевтического оборудования.

Нормировании инфразвука и ультразвука. Постоянно действующий инфразвук нормируется предельно допустимыми уровнями звукового давления в децибелах (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2; 4; 8; 16 и 31,5 Гц. Для непостоянного инфразвука нормируемым параметром выступает эквивалентный по энергии общий уровень звукового давления по шкале линейной частотной характеристики «Lin» (дБ Lin).

Воздушный низкочастотный ультразвук нормируется уровнями звукового давления в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5; 16; 20; 25; 31,5--100 кГц. Контактный высокочастотный ультразвук регламентируется величиной виброскорости или ее логарифмическим уровнем (дБ). При этом, предельно допустимое значение общего уровня звукового давления постоянного инфразвука и допустимый уровень низкочастотного ультразвука в рабочей зоне не должны превышать 110 дБ.

Физические и гигиенические основы оценки вибрации. Вибрацией называется механический колебательный процесс, возникающий в твердых телах и системах в результате неуравновешенных силовых воздействий при вращательном или возвратно-поступательном движении элементов, а также при соударении

деталей. Источниками производственной вибрации выступают технологическое оборудование, транспортно-технологические машины и ручной механизированный инструмент.

Основными кинематическими и временны́ми параметрами вибрации являются:

– амплитуда виброперемещения x_m, м;

– виброскорость v, м/с;

– виброускорение a, м/с²;

– период колебаний T, с;

– частота колебаний f, Гц.

Оценка вибрационных нагрузок в производственных условиях выполняется с использованием логарифмических уровней [36].

Уровень виброскорости L_v (дБ) и уровень виброускорения L_a (дБ) рассчитываются по формулам [26]:

$$L_v = 20 \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \qquad (1.5)$$

$$L_a = 20 \lg\left(\frac{a}{a_0}\right) \qquad (1.6)$$

где v и a – средние квадратические (действующие) значения виброскорости (м/с) и виброускорения (м/с²); $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с – стандартное опорное (пороговое) значение виброскорости; $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с^2 – стандартное опорное (пороговое) значение виброускорения.

Классификация вибрации. «Классификация вибрации в зависимости от источника, направлению действия, типу источника, времени и способа воздействия на человека приведена на рисунке 1.5» [29].



Рисунок 1.5. – Классификация вибрации

Такая классификация помогает специалистам по охране труда безошибочно определить, как именно виброакустические факторы влияют на человека на конкретном рабочем месте. Эти данные решают сразу две задачи: позволяют подобрать подходящие средства индивидуальной и коллективной защиты (ту же виброизоляцию или вибропоглощение) и гарантируют точные расчёты во время специальной оценки условий труда (СОУТ).

Вибрационные нагрузки серьёзно бьют по нервной и сердечно-сосудистой системам. Если человек долго работает в условиях, где превышен предельно допустимый уровень (ПДУ) вибрации, у него может развиться специфическое профессиональное заболевание - вибрационная болезнь, которую также называют синдромом «белых пальцев» или феноменом Рейно [37].

Вибрационная патология развивается поэтапно, задевая сразу несколько систем организма:

– Нервная система и ЦНС. Появляются парестезии и онемение в конечностях, человек хуже чувствует прикосновения и боль, а вегетативная регуляция даёт сбой.

– Сосудистая система. Возникает ангиоспазм, из-за которого нарушается микроциркуляция крови. Периферические сосуды сжимаются, и кисти рук постоянно мёрзнут.

– Опорно-двигательный аппарат. Суставы разрушаются от артроза, воспаляются сухожильные влагалища (тендовагинит), а мышечная ткань постепенно атрофируется.



Рисунок 1.6. – Последствия вибрационной болезни

На рисунке 1.6 слева направо показаны четыре последовательных состояния кистей, наглядно отражающие реакцию периферических сосудов и этапы развития болезни:

Первая рука - норма. Здоровая кисть с нормальным кровоснабжением и ровным телесным оттенком кожи.

Вторая рука - парестезия и гиперемия. Это первые звоночки заболевания: нервные окончания раздражаются от вибрации, поэтому человек начинает чувствовать онемение, зуд, покалывание и «мурашки» в кончиках (дистальных фалангах) пальцев.

Третья рука - ишемическая фаза (ангиоспазм). Тот самый классический «синдром белого пальца» (акроангиоспазм). Капилляры и мелкие артерии резко

сжимаются, перекрывая приток крови к кончикам пальцев. Кожа мгновенно бледнеет, становится восковой и холодной на ощупь. Обычно такие приступы запускает переохлаждение — достаточно помыть руки холодной водой или взяться за остывший металл.

Четвёртая рука - асфиксическая фаза (венозный застой). Финальный этап спазма, когда начинаются стойкие нарушения питания тканей. Пальцы приобретают сине-багровый (цианотичный) оттенок, что сигнализирует о кислородном голодании (гипоксии) и застое венозной крови в капиллярах. Если болезнь затягивается, на этой стадии падает мышечная сила и чувствительность кисти, а в запущенных случаях дело доходит до некроза тканей.

Характер патологического воздействия вибрации на организм определяется её видом и способом передачи. Локальная вибрация возникает при контакте работника с вибрирующими поверхностями ручного инструмента, обрабатываемых деталей или органов управления машин. Она вызывает слабость и судороги в верхних конечностях, головные боли, головокружение, боли в области сердца, а в дальнейшем приводит к вибрационной болезни с выраженным ангиодистоническим синдромом [38].

Воздействие высоких уровней общей вибрации сопровождается расстройством сна, артериальной гипертензией, головокружением с нарушением равновесия, шумом в ушах. На этом фоне развивается вибрационная болезнь с нарушениями периферического и центрального кровообращения и поражением костно-мышечной системы [39].

Гигиеническое нормирование постоянной и непостоянной производственной вибрации основано на суммарной продолжительности её воздействия на работника в течение смены. Вибрационная нагрузка оценивается по эквивалентному скорректированному уровню виброускорения в нормативных частотных диапазонах (таблица 1.9).

Таблица 1.9. – Нормирование общей и локальной вибрации

	Общая вибрация	Локальная вибрация
Эквивалентный корректированный уровень виброускорения, дБ	– в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 2; 4; 8; 16; 31,5; 63 Гц; – в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами: 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80 Гц.	В октавных полосах со среднегеометрическими частотами 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц

Время вибрационного воздействия отсчитывается с момента начала выполнения конкретной технологической операции на рабочем месте.

Параметры виброакустических факторов на рабочих местах измеряются сертифицированными контрольно-измерительными комплексами. Постоянные, непостоянные и эквивалентные уровни шума определяют измерителями уровня звука (шумомерами) и персональными акустическими дозиметрами. Параметры общей и локальной вибрации в нормативных частотных диапазонах измеряют виброметрами и спектральными виброанализаторами.

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, для защиты работника 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.

Согласно ГОСТ 12.1.003–83 «снижение шумового воздействия на работающих промышленных предприятий обеспечивается за счет создания

шумобезопасного оборудования, использования коллективных средств и методов защиты по ГОСТ 12.1.029–80, применения индивидуальных защитных средств по ГОСТ 12.4.051–78, а также посредством строительно-акустических методов. При этом соответствующие защитные меры нужно закладывать уже на стадии проектирования технологических процессов и учитывать их при изготовлении и последующей эксплуатации машин, возведении производственных зданий и сооружений и при организации рабочих мест» [40].

Средства и методы борьбы с шумом применяются на рабочих местах в производственных и вспомогательных помещениях, на территории промышленных предприятий, в жилых и общественных зданиях, а также в жилых районах городов и других населённых пунктов. По отношению к защищаемому объекту все средства защиты делят на две большие категории: коллективные и индивидуальные.

Если говорить о промышленных рабочих местах, то борьбу с шумом там начинают в первую очередь со строительно-акустических методов, применение которых прямо закреплено условиями Соглашения по охране труда:

«– акустически обоснованная проработка генерального плана объекта в сочетании с рациональными архитектурно-планировочными решениями зданий;

– использование ограждающих конструкций, обладающих необходимым уровнем звукоизоляции;

– устройство звукоизолирующих кабин для наблюдения и дистанционного управления оборудованием;

– установка звукоизолирующих кожухов на агрегатах с повышенной шумностью;

– применение акустических экранов и другие.

Отдельного внимания заслуживают организационные способы борьбы с шумом, предполагающие применение следующих подходов:

– подбор рациональных режимов эксплуатации оборудования и ограничение времени пребывания работников в зоне действия машин с повышенным уровнем шума, так называемая «защита временем»;

– обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты органов слуха и другие» [40].

Органы слуха защищают противошумные вкладыши, наушники и шлемы. Толк от них есть, только если они подобраны под уровень и спектр конкретного шума и их действительно носят как положено.

Против воздушного ультразвука действуют теми же способами, что и против шума, с поправкой на его свойства:

«– перевод оборудования на более высокие рабочие частоты, для которых нормируются большие допустимые уровни звукового давления;

– заключение излучающего оборудования в звукоизолирующие кожухи. Их выполняют из стального листа либо дюралюминия толщиной 0,7–1,0 мм с оклейкой внутренней поверхности резиной или тонким (5–10 мм) слоем звукопоглощающего материала; установка такого кожуха дает эффект 50–70 дБ. Возможны и эластичные кожухи из двух-трех слоев резины суммарной толщиной 4–5 мм;

– размещение между работающими и оборудованием акустических экранов из прозрачных материалов;

– применение ограждающих конструкций: когда перечисленные меры невыполнимы или не дают требуемой защиты, ультразвуковые установки выносят в специальные помещения, кабины и выгородки» [40].

Защита от инфразвука включает:

– ослабление инфразвука в самом источнике: повышение «быстроходности» машин в известной мере смещает максимум инфразвуковых колебаний в область слышимых частот;

– увеличение жесткости конструкций, уменьшающее низкочастотные вибрации, которые при определенных условиях сами становятся источником инфразвука;

– изоляция инфразвука средствами звукоизоляции и звукопоглощения;

– установка глушителей шума» [40].

С инфразвуком лучше всего справляться ещё при проектировании машины, гася колебания в источнике: потом звукоизоляция и поглотители в этом диапазоне мало что дадут.

Вибрацию снижают двумя путями – в источнике и на пути распространения. В источнике это малошумные узлы, разумные режимы работы и исправное состояние машин.

На пути распространения вибрацию ослабляют так:

– Архитектурно-планировочные меры. Источники вибрации ставят подальше от людей: оборудование с большими динамическими нагрузками уносят в подвал, на отдельный изолированный фундамент или в дальнюю часть перекрытия. – Акустические меры. Это виброизоляторы и гибкие вставки в коммуникациях; схемы бывают одно-, двух- и трёхзвенные, а саму машину ставят на жёсткую раму или тяжёлую железобетонную плиту.

Организационные меры, или «защита временем», ограничивают время контакта с вибрацией частью смены. В течение смены дают короткие микропаузы и два-три перерыва по 20–30 минут: первый через 1–2 часа после начала работы, второй – часа через два после обеда. В перерывах проводят активный отдых и физиопроцедуры.

Средства защиты от вибрации бывают двух видов:

– коллективные: виброизолирующие площадки, коврики, сиденья операторов. Кресло с пассивной виброизоляцией ослабляет вибрацию выше 63 Гц в 1,5–2 раза;

– индивидуальные: виброзащитные перчатки, рукавицы и вкладыши для рук; специальная обувь, сапоги и стельки для ног.

В.И. Заборов пишет, что в металлургии звукоизолирующие конструкции ставят в двух случаях – если технология позволяет закрыть шумный агрегат кожухом или если люди большую часть смены сидят на постах управления [41]. Кожух или пост, подобранные без учёта конкретного агрегата и смонтированные с ошибками, почти не помогают. А.С. Никифоров и В.И. Заборов объясняют действие ограждений так: «принцип действия ограждающих конструкций основан на том, что преобладающая доля падающей звуковой энергии отражается от ограждения. Повышения звукоизоляции перегородки можно добиться тремя способами. Первый предполагает увеличение массы, приходящейся на квадратный метр перегородки, что достигается повышением плотности материала или наращиванием его толщины. Второй способ состоит в разрыве путей передачи звуковой энергии между противоположными поверхностями перегородки за счёт максимального сокращения числа акустических мостиков. Третий заключается в нанесении на поверхность панели демпфирующих материалов, рассеивающих энергию при вибрации» [41, 42].

Теорию звукоизоляции ограждений полнее всех разработал И.И. Боголепов. Он отмечает, что «последние годы широкое применение получили многослойные материалы типа „сэндвич“, представляющие собой два жёстких слоя с размещённым между ними мягким наполнителем» [41–43]. Передаче звука через конструкции посвящены и другие работы [41, 44, 45]. А вот о снижении шума оборудования кожухами и конструкциями, защищающими от солнечного излучения, пишут мало [46–48, 189].

Занимался этой темой и E. Dambolu: «основное назначение звукоизолирующих материалов состоит в уменьшении звукопроницаемости на границе двух сред, благодаря чему понижается уровень звукового давления в том пространстве, где источник звука, как правило, отсутствует. Для подавления шума

непосредственно в заданной среде применяют средства звукопоглощения, среди которых широко распространены пористые материалы органического, минерального, синтетического и металлического происхождения, обладающие как жёстким, так и податливым скелетом» [49].

Против механического шума и вибрации хорошо работает вибропоглощение. Энергия колебаний уходит в тепло – за счёт внутреннего трения в материале и трения в стыках конструкции. Покрытия для этого делают из полимерных композиций, мастик, битума, реже из песчаных наполнителей и специальных композитов.

Материалы, которые гасят вибрацию и связанный с ней шум, называют виброакустодемпфирующими. Колебания в деталях из таких материалов быстро затухают, и звука конструкция излучает меньше.

Есть и второй эффект: меньшая доля энергии вибрации переходит в звуковую волну, так что тише становится вся конструкция.

Демпфирующие материалы сейчас развиваются в двух направлениях:

– высокодемпфирующие сплавы и композиты, то есть металлические и композиционные материалы, которые сами хорошо рассеивают колебания;

– вязкоупругие полимерные покрытия – слои высокомолекулярных полимеров на металле, поглощающие энергию вибрации.

Высокие демпфирующие свойства материалов гасят амплитуду колебаний конструкций и снижают уровень шума, который они излучают.

По устройству вибропоглощающие покрытия делят на однослойные мягкие, однослойные жёсткие, двухслойные жёсткие и армированные (одно- или многослойные). Какое выбрать, решают по свойствам материала и рабочим частотам. Мягкие однослойные покрытия толстые и тяжёлые, работают они в основном выше 1000 Гц. Жёсткие и армированные тоньше и легче и хорошо гасят вибрацию на 63–1000 Гц, а промышленный шум сосредоточен большей частью как раз там.

Из всех вибропоглощающих конструкций нас больше всего интересуют многослойные: два наружных упругих слоя и мягкий слой между ними. При изгибе средний слой работает на сдвиг и забирает на себя основную часть энергии колебаний. В роли среднего слоя годятся мягкие, жёсткие и армированные покрытия. Применяют такие конструкции в самолётостроении [50], судостроении [51], строительстве [52], машиностроении [53].

В металлургии полимерные демпферы применимы плохо. Оборудование там работает при высокой температуре, в агрессивной среде, под ударами и на больших скоростях, а полимеры выдерживают лишь узкий интервал температур и быстро выходят из строя.

Поэтому на металлургических и машиностроительных заводах приходится гасить шум и вибрацию самим конструкционным материалом – сплавами высокого демпфирования. Колебания в деталях из них распространяются хуже, и конструкция меньше шумит.

М.Н. Скурихина, О.Н. Каллистратова и Г.А. Бычихина отмечают: «Среди существующих высокодемпфирующих сплавов получили промышленное распространение ферромагнитные материалы, сплавы на марганцево-медной, никель-титановой и никель-кобальтовой основах, а также магниевые и отдельные алюминиевые сплавы» [54]. Много сделали для изучения таких сплавов и их применения против шума и вибрации М.М. Хакдодов и Е.Я. Юдин [55, 206].

Но широко эти сплавы пока не применяют. Они дороги, их демпфирование нестабильно, прочности часто не хватает, а при нагреве гасящая способность падает.

Современной технике подходят лишь некоторые композиты – дисперсно-упрочнённые, волокнистые и слоистые; чем они отличаются по структуре и механизму упрочнения, описано у Е.Б. Утепова и П.П. Хохлова [56, 57]. По данным T. Takahagi [58], «наиболее значительным потенциалом в области снижения вибрации и структурного шума обладают многослойные композиционные

материалы, состоящие из двух и более разнородных металлических слоёв». Объясняется это просто: соседние слои по-разному деформируются, и на их границе энергия теряется.

Роль слоистой структуры в гашении вибраций при ударных нагрузках подробно описана в работе [59]. Оказалось, что трёхслойные пластины из дюралюминия Д16АТ снижают резонансные перегрузки в 5–6 раз по сравнению с цельными листами из того же самого сплава. В другом исследовании [60] изучали композиты «сталь Х18Н10Т - сплав АМг6», полученные горячей прокаткой и сваркой взрывом, и зафиксировали у них заметно более низкую способность излучать звук. Чередование разнородных слоёв позволяет гибко комбинировать их механические и демпфирующие свойства. Все эти результаты говорят об одном: многослойные композиты, в которых хотя бы один слой хорошо гасит вибрации и шум, выглядят крайне перспективно.

Все рассмотренные методы защиты работников от шума и вибрации делятся на четыре большие группы: технические, строительно-акустические, организационные и индивидуальные. Максимальный эффект даёт их комбинация, когда колебания гасят сразу на нескольких уровнях - подавляют прямо в источнике, ослабляют на пути распространения и дополнительно глушат виброакустодемпфирующими материалами. Для металлургического оборудования, которое постоянно работает при высоких температурах и ударных нагрузках, особенно перспективны высокодемпфирующие сплавы и многослойные металлические композиты: они удачно сочетают прочность, живучесть и способность эффективно рассеивать энергию колебаний.

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

1.5.1 Виброакустодемпфирующие свойства металлов и сплавов

Для деталей, которые постоянно работают в условиях вибрации, способность материала гасить колебания – виброакустодемпфирование – оказывается не менее важной, чем прочность.

С развитием автомобилестроения, электроники и авиации эта проблема обострилась: вибрация и шум вредят уже не только людям [61, 62], но и самим изделиям, поскольку некоторые режимы случайных высокочастотных колебаний быстро разрушают конструкцию и могут привести к аварии [63].

По статистическим данным, около двух третей отказов промышленного оборудования связаны с вибрацией и шумом. Отсюда требование к конструкционному материалу – сочетать прочность со способностью гасить колебания [64, 65]. Демпфирующие сплавы [66] этому требованию в целом отвечают и в промышленности уже используются [67, 68], но условия эксплуатации становятся жёстче, и от новых сплавов ждут более широкого набора свойств.

Выбор металлических демпфирующих материалов велик [69, 70, 71]: это «…материалы на основе железа — низколегированные стали, сплавы систем железо–хром, железо–кобальт, железо–молибден и железо–вольфрам, а также чугуны; композиции цветных металлов — марганец–медь, никель–кобальт, медь–алюминий и медь–цинк–алюминий; лёгкие сплавы на базе магния и титана; сплавы с эффектом памяти формы типа нитинол (система титан–никель); наконец, материалы с гетерогенной структурой и металлические композиты» [69, 72]. Поскольку в Таджикистане есть собственное производство алюминия (ОАО ТАЛКО), в нашей работе основное внимание уделено алюминиевым сплавам.

Металлы и сплавы, получаемые обычной металлургией, как правило, слабо гасят шум, поэтому ищут материалы с высоким демпфированием. Здесь интересен алюминий: «среди конструкционных металлов он первый по распространенности в

земной коре (8,8% против 5,1% у железа) и входит в состав глин, полевого шпата и бокситов» [73]. Это лёгкий серебристо-белый металл III группы периодической системы с плотностью около $2{,}7$ г/см^3 и гранецентрированной кубической решёткой (период $a = 0{,}4049$ нм), с высокими теплоёмкостью и теплотой плавления. Электропроводность чистого алюминия $99{,}997\%$ составляет примерно 60–65 % от электропроводности меди, модуль упругости – около 70 ГПа, что заметно ниже, чем у сталей.

М.М. Хакдодов отмечает: «Для получения алюминиевых сплавов с различными свойствами производится легирование другими металлами. Наиболее широко в качестве легирующих элементов применяют медь, магний, марганец, цинк, кремний, а в последнее время и литий, но пока в ограниченных масштабах» [55]. Основных марок алюминиевых сплавов в промышленности около 55; по составу, структуре и технологии их делят на деформируемые и литейные, а также на термически упрочняемые и неупрочняемые.

Основные легирующие добавки к алюминию – медь (Cu), магний (Mg), марганец (Mn), кремний (Si) и цинк (Zn); с алюминием они дают различные твёрдые растворы и интерметаллидные фазы.

Подбирая систему легирования, можно управлять фазовыми превращениями, микроструктурой и размером зерна и получать сплав с нужными свойствами – механическими (прочность, сопротивление усталости), технологическими (обрабатываемость резанием, штампуемость, свариваемость) и специальными (демпфирование, коррозионная стойкость).

Кроме основных компонентов, в алюминиевые сплавы вводят модифицирующие добавки, в том числе щелочноземельные и редкоземельные металлы; именно такие сплавы – с Sr, Ba, Sb, Gd и Yb – исследованы нами в главе 4.

От алюминиевых сплавов ждут одновременно и высокой прочности, и способности эффективно гасить вибрации. На рисунке 1.7 наглядно сопоставлены

предел прочности на разрыв (σ) и удельная демпфирующая способность (ψ) для разных металлических сплавов. Как следует из рисунка 1.7, «…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 считается как металл со средним демпфированием. Когда значение удельного демпфирования больше 10, но меньше 100, этот тип сплава характеризуется как металл с высоким демпфированием» [74].

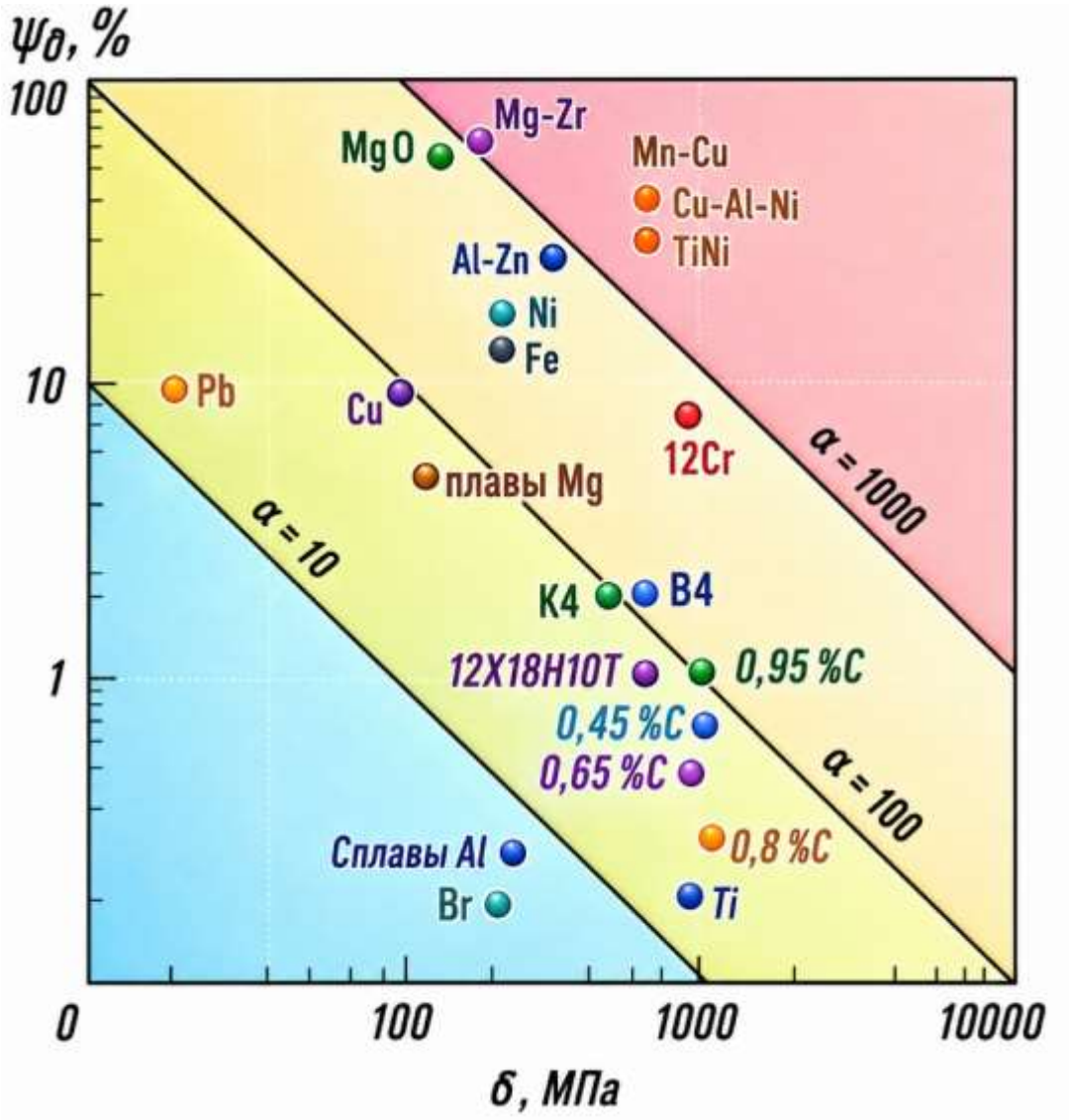


Рисунок 1.7. Соотношение прочности и демпфирующих характеристик конструкционных металлических материалов (по данным К. Сугимото)

Н. Ф. Лашко классифицирует алюминиевые сплавы прежде всего по способу получения изделий, выделяя «…литейные сплавы, используемые для производства фасонных отливок, и деформируемые, перерабатываемые методами пластической деформации, такими как прокатка, прессование, ковка и штамповка» [76]. И среди литейных, и среди деформируемых есть сплавы термически упрочняемые (их закаливают и старят) и неупрочняемые. Свойства задаются главным образом системой легирования и фазовым составом, тогда как малые добавки лишь корректируют их. Это и позволяет применять алюминиевые сплавы в авиастроении [76], судостроении [77], электротехнике [78] и машиностроении – в том числе в узлах, работающих при вибрации, ударах и нагреве. Для нашей задачи отсюда следует, что демпфирующие свойства сплава нужно оценивать уже на стадии проектирования детали, наряду с прочностью.

Демпфированию алюминиевых сплавов посвящено немало работ. Первые сведения о рассеянии энергии в дюралюминии приведены в ранней работе [79], а результаты исследований разных алюминиевых сплавов обобщены в [80, 81]. Автор [79] указывает: «…показано преимущество алюминия по уровню демпфирования по сравнению со сталями: изучали дюралюминий 17S -T и стали марок SAE1025 и SAE4130 при крутильных колебаниях». (17S–T – обозначение по системе Алюминиевой ассоциации классического дюралюминия, современный аналог – 2017-T4; SAE 1025 – конструкционная углеродистая сталь с содержанием углерода около 0,25 %.)

Систематически вопрос о создании высокодемпфирующих алюминиевых сплавов изучен в работах [82, 83].

Главный вывод этих работ, сформулированный М. М. Хакдодовым, таков: лучше демпфируют сплавы алюминия с элементами, малорастворимыми в нём в твёрдом состоянии (Fe, Ti, Cr, Zr, Ce, Mn), хуже – с хорошо растворимыми (Mg, Zn, Cu) [55]. Это важно для нашего выбора легирующих добавок.

Впрочем, по сравнению с чистым металлом легирование снижает внутреннее трение в обоих случаях. В магниевых сплавах, где алюминий – основной легирующий элемент [84], картина иная: сплав AZ91D [85] при комнатной температуре гасит колебания втрое лучше нагартованного алюминия 1100-H18, причём демпфирование растёт с площадью границ зёрен и количеством фазы Mg17Al12. Этот сплав применяют в автомобильных деталях – приборных панелях, рулевых колёсах, каркасах сидений [86], крышках редукторов, а также в выхлопных системах мотоциклов и корпусах приборов. У сплавов AZ31, AZ61 и AZ80 после термообработки демпфирование падает с ростом содержания Al и зависит от времени старения, а выделения Mg17Al12 упрочняют сплав [87]. Механизм демпфирования рассматривают в рамках теории Гинзбурга–Ландау (Г–Л) [79].

Для систем Al–Sn и Al–Zn авторы [82, 83] нашли немонотонную зависимость: пока твёрдый раствор насыщается, декремент падает, а при появлении избыточных фаз растёт снова.

В системе Al–Zn зависимость демпфирования от состава усложняется мягкой цинковой фазой. Растворённый цинк в малых количествах на демпфирование влияет слабо, а в интервале 25–70 % Zn оно снижается – вначале быстрее, затем медленнее. С.Д. Айбиндер объясняет это тем, что «…количество мягкой составляющей само по себе не определяет уровень демпфирования: сказывается форма и характер распределения мягкой фазы (подобно графиту в чугунах), а между твёрдостью и демпфирующей способностью нет прямой корреляции — цинк, будучи твёрже алюминия, рассеивает энергию лучше него» [83].

Упрочнить двойные сплавы третьим компонентом без снижения демпфирования впервые попытались М. Е. Дриц, Л. Л. Рохлин и Г. В. Рючина, «…предложившие композиции алюминия с 35–45% Zn с добавкой 0,08% Ti либо 0,08% Ti + 0,1% Zr: модифицирующее действие титана и циркония формирует в них плотную мелкозернистую структуру, благоприятную и для технологических, и для демпфирующих характеристик» [155].

Стандартные литейные сплавы различаются по демпфированию мало: АК9 лишь немного лучше АК12 (АК9ч) [88], и термообработка Т4 или Т5 не всегда увеличивает затухание. У деформируемого Д16 закалка со старением (Д16Т) даже немного снижает демпфирование по сравнению с отожжённым Д16М. Поэтому стандартные марки сами по себе задачу не решают – нужны специально модифицированные сплавы.

«Современные исследования в области виброакустического материаловедения демонстрируют устойчивую тенденцию к расширению работ, посвящённых созданию многокомпонентных алюминиевых сплавов, легированных редкоземельными и щелочноземельными элементами. Такой интерес обусловлен их перспективностью в качестве виброакустодемпфирующих материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками» [89÷98].

Ю. К. Фавстов с соавторами приводят данные о растворимости РЗМ в магнии и об образуемых ими интерметаллидах. L. Nouha пишет: «…введение редкоземельных элементов в магниевые сплавы оказывает комплексное положительное влияние на их свойства. В частности, повышаются прочностные характеристики при различных температурных режимах эксплуатации, улучшается технологичность литья и оптимизируется структура материала» [101], и далее: «Его особая электронная структура и очевидный упрочняющий эффект сделали сплавы Mg–РЗМ предметом пристального внимания исследователей в последние годы» [101]. Так, иттрий (Y) в количестве 0,5–3,0 мас. % измельчает зерно магниевого сплава и повышает его прочность и демпфирование [101, 102].

«Элемент Gd (гадолиний) считается одним из наиболее эффективных редкоземельных элементов для улучшения механических свойств магниевых сплавов» [103]. Его упрочняющий эффект «…обусловлен упрочнением твёрдого раствора, поскольку атомный радиус элемента Gd значительно отличается от атомного радиуса элемента Mg, а диапазон пределов твёрдого раствора широк»

[103]; поэтому «Gd считается ещё более эффективным упрочняющим элементом, чем общепризнанные элементы, такие как алюминий, цинк и марганец» [104, 105].

В одной из зарубежных работ показано, что при легировании магния гадолинием (Gd) после затвердевания формируется параллельное распределение второй фазы, что провоцирует образование большого числа параллельных дислокаций в матрице α-Mg сплава Mg–Gd [106]. Такая дислокационная структура позволяет эффективно затормозить падение демпфирующих свойств, которое обычно неизбежно возникает при увеличении концентрации легирующего элемента. При «…увеличении содержания Gd с 1 мас. % до 6 мас. % внутреннее трение (Q−1) уменьшилось с 0,16 до 0,05, а предел текучести увеличился с 30 МПа до 84 МПа при амплитуде деформации 0,8 × 10−3. Учитывая баланс между демпфирующими и механическими свойствами, сплав Mg–Gd может быть использован в качестве потенциального материала для разработки демпфирующих магниевых сплавов» [106].

Подбирать составы помогают расчётные методы – эмпирическая оптимизация [72, 107, 108] и многомерные модели «состав - свойство» [109–112].

Хорошие результаты дают и композиционные материалы, сохраняющие высокую прочность и демпфирование в широком интервале температур [111÷124].

По данным В.А. Патеримова, Г.К. Мальцевой, В.С. Новоселова и других, широкое практическое распространение «…получили многослойные тонколистовые материалы, снабжённые неметаллическими, металлическими и комбинированными слоистыми покрытиями и характеризующиеся высоким уровнем демпфирования» [125]. В этой же работе «…подтверждается высокая эффективность демпфирующих свойств листовых материалов из алюминиевых сплавов Д16 и АМг6, а также сталей 08кп и Х15Н30ВМТ, оснащённых многослойными вибропоглощающими покрытиями. В ходе работы испытаны двух-, четырёх- и шестислойные структуры с чередованием податливых и жёстких

слоёв» [125]. Покрытия состояли из герметиков, клеёв, мастик и виброизолирующих материалов с прослойками алюминиевой и латунной фольги.

К. Натталл (K. Nuttall) приводит данные о том, что «…различные электролитические покрытия, содержащие олово, хром, серебро, кадмий и иные металлы, способствуют повышению демпфирующей способности стали благодаря микропластическому рассеянию энергии в пограничном слое, прилегающем к нанесенному покрытию» [122].

«Демпфирующие характеристики слоистых композиций, полученных совместной пластической деформацией разнородных металлов, а именно меди, алюминия, цинка, олова, свинца и кадмия, в сочетании с графитом проанализированы в работе» [127]. В таком композите энергия теряется и в каждом слое, и на границах между слоями, поэтому суммарное внутреннее трение записывают как:

$$Q^{-1} = Q_0^{-1} + Q_{\text{ч}}^{-1} \qquad (1.7)$$

где Q^{-1} – внутреннее трение (демпфирующая способность) многослойного композиционного материала; Q_0^{-1} – рассеяние энергии внутри отдельных слоев; $Q_{\text{ч}}^{-1}$ – рассеяние энергии на межслойных границах (в контакте между слоями).

Японские исследователи изучили демпфирование и ударную вязкость слоистых композитов «компактный металл — пористый металл» [128], полученных горячей прокаткой в водороде полос стали 70 (3,2 мм) и лент порошкового железа ПЖ1М (0,7 мм, пористость 37 %) [128]. По сравнению с компактной углеродистой сталью они гасят колебания в 2–3 раза лучше: энергия рассеивается в пористых прослойках [128].

В работе В.А. Патемирова и соавторов подчёркивается «…самостоятельный вклад плакирующих слоёв в суммарное рассеяние энергии, рассматриваемый в сопоставлении с затуханием колебаний, происходящим на границах раздела слоёв»

[125]. Исследован трёхслойный композит: сталь ВНС-2 (08Х15Н2Д2Т) аустенитно-мартенситного класса, плакированная с двух сторон сплавом К65Н35 (65 % кобальта, 35 % никеля). Приведены «зависимости декремента колебаний от амплитуды напряжений для многослойной композиции К65Н35–ВНС-2–К65Н35 в состоянии после холодной прокатки, а также после окончательной термической обработки, включавшей закалку с 900°С в масле и последующий отпуск при 450 °С в течение одного часа» [125]. После термообработки демпфирование оказалось заметно выше, чем после холодной прокатки, – значит, энергия поглощается главным образом в плакирующих слоях.

Интересны и сверхпластичные сплавы: их демпфирование связано с интервалом температур, где сверхпластичность выражена сильнее всего [125, 130, 131]. Н.Д. Сазонова для сплава Zn–22 %Al приводит следующее: «…по эвтектическому сплаву Zn–22 %Al показывают, что как при пластинчатой, так и при мелкозернистой структуре его демпфирующая способность возрастает синхронно с температурным проявлением сверхпластичности, причём для зернистого состояния максимум рассеяния энергии приходится на 200 °С, то есть на ту же область, где сплав проявляет сверхпластичность» [130]. Затухание автор связывает с обратимым проскальзыванием по границам зёрен, характерным и для обычных сплавов [125, 130]; по-видимому, именно процессы на границах зёрен и определяют рассеяние энергии.

К сходному выводу пришли авторы [132]: высокотемпературный максимум внутреннего трения имеет иную природу, чем низкотемпературный, и вызван обратимым смещением ступеней границ зёрен или скольжением вдоль них, то есть структурной релаксацией границ и движением дислокаций на них.

Обширные исследования охватили «…слоистые металлические композиции с различными сверхпластичными сплавами: прослежено, как объёмная доля сверхпластичной составляющей и технологические параметры — степень деформации, температура и длительность отжига — сказываются на

демпфирующих и механических свойствах на всех стадиях передела; достигнутые значения этих характеристик приведены в таблице 1.10. Опробованные как демпфирующие прокладки под токарные резцы, эти материалы уменьшили амплитуду вибрации в 1,5–2 раза; поверхность после обработки стала чище, а резцы служили дольше [132].

Технология соединения разных металлов описана во многих работах [134÷139], однако механизм соединения в твёрдом состоянии трактуется по-разному.

Таблица 1.10. Механические и демпфирующие характеристики слоистых металлических композиций

Материал / Композит	Декремент затухания δd	σB, МПа	δ, %	Распределение микротвердости по слоям (1 / 2 / 3), МПа
Трехслойные металлические композиции				
Сталь 08пс – Л63 – Сталь 08пс	$1{,}8 \cdot 10^{-2}$	395	28	215 / 117 / 216
Л63 – Сталь 08пс – Л63	$2{,}9 \cdot 10^{-2}$	360	30	113 / 206 / 115
Сталь 08пс – ВНС48 – Сталь 08пс	$9{,}0 \cdot 10^{-3}$	665	18	210 / 354 / 212
ВНС48 – Сталь 08пс – ВНС48	$1{,}6 \cdot 10^{-2}$	585	22	348 / 205 / 350
Монометаллические материалы				
Сталь 08пс	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	385	26	159 (монослой)
Латунь Л63	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	410	42	143 (монослой)
ВНС 48	$4{,}8 \cdot 10^{-3}$	700	24	351 (монослой)

Предлагались плёночная [140], рекристаллизационная [141], диффузионная [134, 142], дислокационная [135] и энергетическая [143] гипотезы; на практике режимы получения слоистых, в том числе демпфирующих, композитов подбирали опытным путём [144]. А.С. Тихонов указывает: «…для композиций «сталь Х18Н10Т — сплав АМг6» (горячая прокатка на воздухе, сварка взрывом) и «сталь Х18Н10Т — ниобий — сталь Х18Н10Т» (горячая прокатка в вакууме, сварка взрывом) рассеяние энергии упругих колебаний во многом задаётся состоянием

контактной зоны слоёв — присутствующими там окисными и интерметаллидными включениями и набором фазовых составляющих» [137].

Он же описывает «…армированные квазимонолитные (АКМ) и квазислоистые (КСМ) композиты с улучшенными механическими и демпфирующими свойствами; в частности, были изучены 08Ю–АКМ, 08Ю–КСМ и 09Г2СФ–АКМ. В 08Ю–КСМ наружные слои выполнены из стали 08Ю, внутренние – из 15пс; 08Ю–АКМ объединяет стали 08Ю и 10ХНДП, а 09Г2СФ–АКМ – стали 09Г2СФ и 09Г2ФБ» [137]. Преимущество таких композитов авторы объясняют нелинейным поведением границ слоёв: при малых амплитудах их вклад в демпфирование мал, а с ростом амплитуды микросдвиги на границах становятся главным источником потерь.

В работе [138] для сплавов Al–Sn и Al–Zn демпфирование связали прежде всего с микропластической деформацией мягкой составляющей – олова или твёрдого раствора алюминия в цинке; ту же роль у сталей играют феррит и аустенит [140]. М. М. Хакдодов подчёркивает: «…при наличии в структуре мягкой составляющей следует отметить повышенную способность к рассеянию энергии колебаний. В структуре сплавов алюминия с оловом это может быть олово, а в сплавах с цинком – твёрдый раствор алюминия в цинке» [132].

Подводя итог обзору, отметим следующее. Демпфирование сплава определяется его химическим и фазовым составом, микроструктурой, наличием пластичной составляющей и состоянием границ между слоями. Улучшить его можно двумя путями – комплексным легированием алюминиевых и магниевых сплавов, в том числе редкоземельными (РЗМ) и щелочноземельными (ЩЗМ) металлами, и созданием слоистых композитов. Главная трудность – упрочнение почти всегда снижает демпфирование, и между прочностью и внутренним трением приходится искать компромисс. Именно поэтому в главах 3 и 4 мы исследовали модифицированные литейные и деформируемые алюминиевые сплавы и композиты на их основе.

1.5.2. Механизмы рассеивания энергии колебаний в виброакустодемпфирующих материалах

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 [145–149].

Наибольшее признание среди них получили механизмы, обусловленные следующими процессами: Зернограничным проскальзыванием и сдвигами по межфазным границам; Микропластическим деформированием и движением дислокаций; Диффузионными и термоупругими явлениями, сопровождающими прохождение упругих волн через кристаллическую решётку; Вязкоупругим сопротивлением и магнитомеханическими эффектами (характерными для ферромагнетиков).

При знакопеременном нагружении твёрдого тела в нём одновременно включаются сразу несколько механизмов рассеяния энергии, а доля каждого из них напрямую зависит от режима и интенсивности воздействия. По характеру энергетических потерь процессы внутреннего трения принято разделять на две группы: Амплитудно-независимые (фоновые) - потери, величина которых практически не меняется при росте деформации (например, термоупругие или диффузионные эффекты при малых нагрузках) и Амплитудно-зависимые - механизмы, эффективность которых резко возрастает с увеличением амплитуды приложенной нагрузки и определяется интенсивностью релаксационных и сдвиговых процессов в структуре.

В условиях циклического нагружения металлов затухание носит преимущественно гистерезисный характер и напрямую задаётся амплитудой деформации. Основная доля колебательной энергии при этом необратимо расходуется на микропластические сдвиги дислокаций, а в ферромагнитных

сплавах, дополнительно на магнитомеханические явления (перемагничивание доменов под действием напряжений).

Измеряемые показатели виброакустического демпфирования формируются под влиянием целого комплекса факторов, определяющих интенсивность каждого конкретного механизма рассеяния энергии.

В основе зернограничной релаксации лежит то, что граница зерна не сопротивляется касательному напряжению вдоль себя и ведёт себя подобно вязкой прослойке [150, 151]. Возникающее внутреннее трение зависит от температуры, размера зерна и частоты колебаний [152, 153]; при отсутствии структурных превращений главным становится размер зерна, и в мелкозернистом металле потери выше [149, 150].

«Амплитудно-зависимое демпфирование металлов чаще всего трактуют в рамках дислокационной теории Гранато–Люкке–Келлера (ГЛК), схема которой показана на рис. 1.8» [154]: «дислокационная линия уподобляется в ней натянутой тяжелой струне, что делает физику явления простой и наглядной» [154,156]. Дислокациям приписывают шесть механизмов демпфирования; «по виду амплитудной, частотной и температурной зависимостей их относят к релаксационным, резонансным либо гистерезисным» [149,150].

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

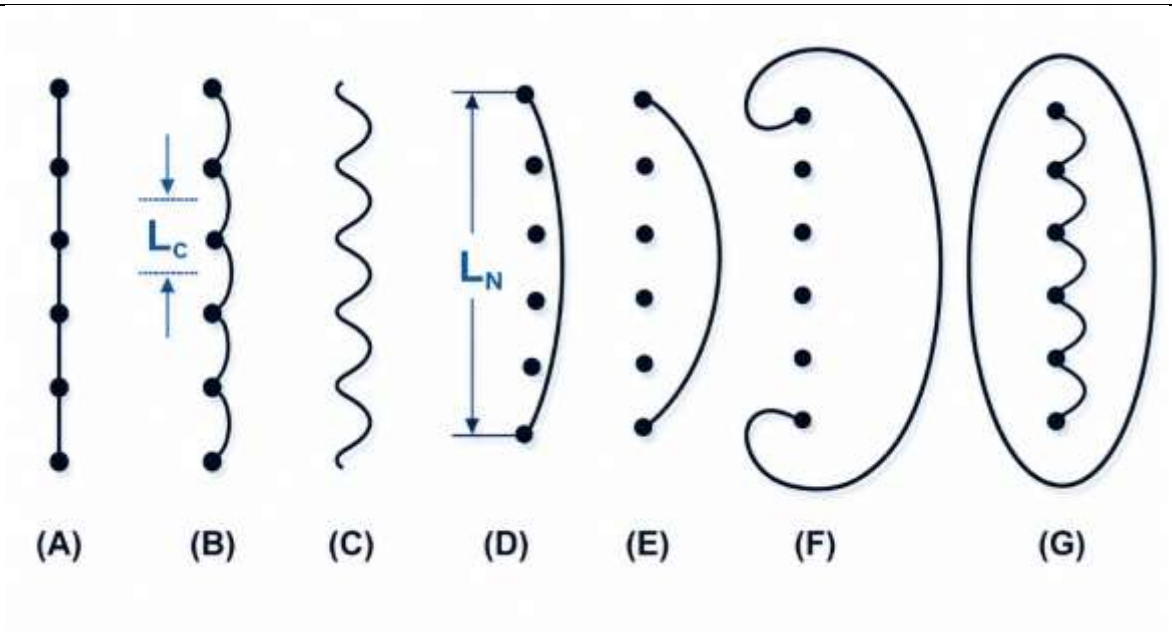
$$Q^{-1}(E_0) = Q_1^{-1} + Q_2^{-1}(E_0) + Q_1^{-1}\frac{C_1}{E_0}\exp(-\frac{C_2}{E_0}); \quad (1.8)$$

где: C1, C2 – структурные постоянные. Здесь C_1 и C_2 – структурные постоянные, отношение которых ($C_1/C_2 \sim pdL^3N$) отражает плотность дислокаций pd, вовлеченных в необратимый отрыв от точечных дефектов;

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

При амплитудах $E_o \leq E_{k1}$ доминирует первая составляющая, в интервале $E_{k1} \leq E_o \leq E_{k2}$ – 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» [154].



где:

A–C, прогиб дислокационного сегмента между двумя слабыми точками закрепления (примесными атомами) по мере роста приложенного напряжения;

D, E, отрыв дислокации от слабых точек закрепления и её свободное перемещение между сильными барьерами (узлами дислокационной сетки);

F, G, дальнейший изгиб дислокационной петли уже между сильными точками закрепления при последующем увеличении напряжения (вплоть до работы источника Франка - Рида) [155, 156].

Рисунок 1.8. Схематическая диаграмма теоретического режима дислокации ГЛК

«Вместе с тем, гистерезисно-локальная концепция базируется на ряде упрощающих допущений, вследствие чего зависимость (1.8) не во всех случаях

находит экспериментальное подтверждение, что особенно заметно проявляется в области низких частот. Предпринятые многочисленные попытки ее видоизменения и совершенствования так и не позволили создать пригодную для практического использования теорию демпфирования, опирающуюся на дислокационный гистерезис» [157–159]. Микропластическое рассеяние энергии в металлах и сплавах связано с неоднородностью их внутренней структуры. Под действием циклических внешних нагрузок в отдельных локальных участках материала возникают очаги микропластической деформации, которые сопровождаются необратимыми потерями механической энергии. Интенсивность данного механизма демпфирования определяется структурным состоянием сплава, характером распределения фаз и дефектов кристаллической решетки, а также условиями нагружения.

Исходя из этого, в работе зарубежного исследователя предложена «…методика, принимающая во внимание микропластическое деформирование структурных элементов, а именно зеренных блоков. В силу анизотропии модуля упругости колебательное нагружение поликристалла приводит к неравномерному нагружению отдельных зёрен, а при знакопеременном напряжении в них формируются напряжения противоположного знака, которые вовлекают в пластическое течение и соседние зёрна» [160]. При этом «…циклическое деформирование сопровождается упрочнением материала, а установившаяся устойчивая неоднородность поля напряжений вынуждает микропластическую деформацию повторяться в каждом цикле, однако, как правило, уже в других зёрнах. Именно этим обстоятельством объясняются высокий и длительно сохраняющийся уровень затухания, а также его возрастание с увеличением амплитуды колебания» [160].

В работе Алиева С.Г. и ряда других этот подход доведен до статистической формы: «внутреннее рассеяние энергии там выводится из того, что циклически деформируемый материал неоднороден и по структуре, и по полю напряжений»

[151]. Согласно проведенным исследованиям [151], принятая функция распределения напряжений по зернам позволяет установить, что «…при нагружении образца до уровня, в среднем не достигающего предела текучести, отдельные зерна оказываются нагружены по-разному, и местами предел текучести все же превышается; распределение энергии по множеству пластически деформированных зерен описывается функцией Рк. Интеграл, входящий в (1.9), имеет смысл числа пластически деформированных зерен в единице объема при данном среднем напряжении и определяется пределом текучести зерна, средним распределением напряжений по зернам и формой кривой нормального распределения Гаусса» [151]. Следовательно «…потеря энергии в единице объема материала за один цикл колебания может определятся уравнением, показывающий распределение энергии по отдельным пластически деформированным зернам при достаточно большом их числе:

$$\Delta W = 2\overline{N}K_{cp}\int_{\sigma T}^{\infty} P(\sigma)d\sigma = 2\overline{N}K_{cp}[A_o + B(\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_T})^m]; \quad (1.9)$$

где: $\overline{N}$ –число зерен в единице объема материала; Кср – средняя «энергоемкость» микрообъема, представляющая собой среднюю функцию распределения Р(к); σср – константа материал (в первом приближении); m, В и Ао – константы, зависящие от дисперсии кривой распределения напряжений по зернам.

В данном случае интеграл $\int_{\sigma_T}^{\infty} P(\sigma)d\sigma$ – это величина, которая характеризует число пластически деформированных зерен в единице объема материала при данном среднем напряжении, которая зависит от предела текучести зерна, среднего распределения напряжений по зернам и от формы кривой нормального распределения закона Гаусса» [151].

Вязкоупругие потери – это потери на вязкое трение при деформации; они типичны для полимеров. По модели Кельвина–Фойгта [152, 162, 163] такие потери зависят не от амплитуды напряжения, а от скорости деформации, то есть от частоты.

Насколько хорошо гасит колебания многослойная композиция, зависит от ряда факторов, разобранных в работах [6, 162, 164]: толщины, плотности и комплексных модулей упругости и сдвига вибропоглощающего слоя, упругости и плотности несущих металлических слоёв, частоты возбуждения.

Демпфирование можно поднять, подбирая свойства и геометрию покрытия: наносить его лишь на самые нагруженные участки или резать наружный сдерживающий слой на сегменты оптимальной длины [12, 165].

Какой механизм рассеяния главный, зависит от строения материала. В однородном сплаве энергия теряется в объёме матрицы, в многослойном композите – ещё и в прослойках и на границах слоёв.

Всё это говорит в пользу литейных и деформируемых алюминиевых сплавов с добавками щелочноземельных (ЩЗМ) и редкоземельных (РЗМ) металлов и композиций из них как материала для защиты от шума и вибрации при соударении деталей машин.

Итак, колебания в демпфирующих материалах гасятся за счёт четырёх механизмов: зернограничной релаксации, дислокационных и микропластических сдвигов, вязкоупругих потерь и взаимодействия слоёв в композитах. Результат зависит от размера зерна, свойств слоёв и границ, а также от температуры, частоты и амплитуды нагрузки.

Модифицированные алюминиевые сплавы и многослойные композиты на их основе мы считаем подходящим средством для снижения шума и вибрации оборудования, работающего с ударами.

Выводы к первой главе

По итогам анализа охраны труда на промышленных предприятиях Таджикистана можно сделать следующие выводы.

1. На промышленность приходится значительная часть социально-экономических задач страны. В ближайшие годы она способна обеспечить внутренний и внешний рынки сырьём и готовой продукцией.

2. От охраны труда и промышленной безопасности зависят травматизм, профессиональная заболеваемость и производительность труда, поэтому они остаются первоочередными задачами производства.

3. Система управления охраной труда (СУОТ), сложившаяся в советские годы, во многом перестала работать: связи между государственным и заводским уровнями управления нарушены, единого механизма координации нет.

4. Шум и вибрация – одни из главных вредных производственных факторов: больше трети работников промышленности трудятся там, где они превышают ПДУ.

5. Классификация производственного шума и систематизация его физических параметров позволяют точнее прогнозировать его вред для человека и окружающей среды.

6. Длительное действие шума и вибрации поражает слух, опорно-двигательный аппарат и сердечно-сосудистую систему, снижает трудоспособность (приблизительно до $50 - 53\%$) и ведёт к стойким профессиональным заболеваниям – нейросенсорной тугоухости и вибрационной болезни.

7. Вибрацию оценивают по кинематическим параметрам (X_m, v, a, T, f), а нормируют постоянную и непостоянную вибрацию по эквивалентному корректированному уровню виброускорения с учётом фактического времени воздействия.

8. Защищаться от шума и вибрации нужно сразу несколькими способами – организационными, архитектурно-планировочными, акустическими и инженерными, гася колебания и в источнике, и на пути распространения.

9. Самый действенный инженерный способ против механического шума и вибрации – вибропоглощение. Полимерные покрытия плохо переносят нагрев и тяжёлые условия, поэтому в тяжёлом машиностроении и металлургии перспективнее конструкционные демпфирующие сплавы и многослойные композиты из них.

10. Кардинально снизить виброакустическую нагрузку на рабочих местах позволяет подавление энергии колебаний непосредственно в зоне их зарождения при виброударном соударении деталей машин и механизмов , за счёт применения высокодемпфирующих конструкционных материалов.

11. Несмотря на значительный объём выполненных исследований, до настоящего времени отсутствует единое представление о механизмах диссипации энергии механических колебаний в материалах, применяемых для защиты от виброакустических воздействий, обусловленных виброударными процессами при соударении деталей машин, механизмов и технологического оборудования.

12. Существующие методы экспериментальной оценки не обеспечивают комплексного определения виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов, используемых для защиты от виброакустических факторов, возникающих вследствие виброударного взаимодействия деталей машин, механизмов и технологического оборудования. Это ограничивает возможность объективной оценки эффективности применения материалов и затрудняет их научно обоснованный выбор для практического применения.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

2.1. Анализ условий труда и оценка виброакустических факторов на промышленных предприятиях

Несмотря на государственные и отраслевые мероприятия, условия труда на многих предприятиях пока не в полной мере отвечают требованиям безопасности и производственной санитарии. Воздействие вредных и опасных факторов сохраняется, и это требует дальнейшего совершенствования организационных, технических и технологических мер виброзащиты. Основной причиной «производственного травматизма и профессиональных заболеваний является воздействие на работающий персонал опасных и вредных производственных факторов, одним из которых является повышенный уровень шума и вибрации от производственного оборудования» [166, 167].

Условия труда и виброакустические факторы в промышленности анализировались по статистическим данным о производственном травматизме и профессиональной заболеваемости [168].

Среди факторов, не отвечающих санитарно-гигиеническим нормам, в структуре неблагоприятных условий труда преобладают повышенные уровни шума и вибрации (таблица 2.1). Их снижение в динамике объясняется перепрофилированием производства, мероприятиями по улучшению условий труда и профилактикой производственного травматизма [15].

Таблица 2.1. – Численность 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	1 529	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	–

Общее число работников, подвергающихся неблагоприятным производственным факторам, сократилось. Однако в 2024 г. по-прежнему значительна доля рабочих мест с воздействием шума, вибрации, пыли и газов, а также с тяжёлым физическим трудом. Работа по обеспечению безопасных условий труда, включая контроль и снижение уровней шума и вибрации на промышленных предприятиях, поэтому должна быть продолжена.

Для улучшения условий труда, снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости 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» [163].

Данные о несчастных случаях на промышленных предприятиях за первый квартал приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. – Количество несчастных случаев на промышленных предприятиях за первый квартал 2025 года

№ п/п	Наименование предприятия	Количество несчастных случаев
1.	Строительство объектов ОАО «Рагунский ГЭС»	5
2.	ОАО «Таджикская алюминиевая компания»	2
3.	ООО «Таджикско–китайская горнопромышленная компания»	2
4.	ЗАО «Таджикский металлургический комбинат»	1
5.	ООО СП «Зарафшон»	1
6.	ООО «Нури минерал», подрядчик ООО ТА МК «Анзоб»	1
7.	ООО «Тит Антен», подрядчик ЧП Шахты «Фон–Ягноб»	1
8.	ООО «Цементный завод имени Б. Самадов»	1
9.	ООО «Сеганч»	1
10.	ООО «Нури Кухсор», подрядчик ЧП Шахты «Фон–Ягноб»	1
11.	ООО «Ганчи Орие»	1
12.	ЗАО «Асфалтобетонный завод»	1
13.	ООО «Чженсзян Сзянхуэй Инжиниринг» в Таджикистане	1
14.	ООО «Элит–Строй–Сервис»	1
15.	ООО «Баракат»	1
16.	ООО «Точир»	1
17.	ООО «Заринк»	1
18.	ООО «Сангрезаи Шахринав»	1
19.	Частный предприниматель Саидов Бахтовар Саидович	1
20.	Всего	25

Большая часть несчастных случаев, как видно из таблицы 2.2, пришлась на предприятия горнорудной и металлургической промышленности. Это говорит о низком уровне организации работы по охране труда и безопасности на производстве.

Причинами несчастных случаев, в том числе смертельных, стали нарушения правил техники безопасности, отсутствие предупреждающих знаков на объектах, эксплуатация оборудования и конструкций, не отвечающих требованиям безопасности, нарушения порядка приёма на работу и ознакомления с должностными инструкциями, неправильное ведение журналов инструктажа, необеспеченность пострадавших средствами индивидуальной защиты, работа с

машинами без руководства по эксплуатации, допуск к опасным работам необученных работников без паспорта специальности и др.

Таблица 2.3. – Показатели производственного травматизма в Республике Таджикистан на период 2020–2024 годы

Показатель	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Зарегистрировано несчастных случаев на производстве, случаев	31	39	—	52	48	46
Погибло работников, чел.	8	24	—	36	30	40
Получили травмы, чел.	33	45	—	34	26	27
Всего погибших и травмированных, чел.	41	69	—	70	56	67

Производственный травматизм в Республике Таджикистан в 2020–2025 гг. заметно колебался и по числу несчастных случаев, и по тяжести их последствий. Число зарегистрированных случаев выросло с 31 в 2020 г. до 52 в 2023 г., затем снизилось до 48 в 2024 г. и 46 в 2025 г. При этом число погибших работников в 2025 г. достигло 40 человек против 30 в 2024 г. Проблема тяжёлого и смертельного травматизма на промышленных и других подконтрольных объектах сохраняется.

Производственные травмы оборачиваются значительными материальными потерями для экономики страны; соответствующие данные представлены на рисунке 2.2.

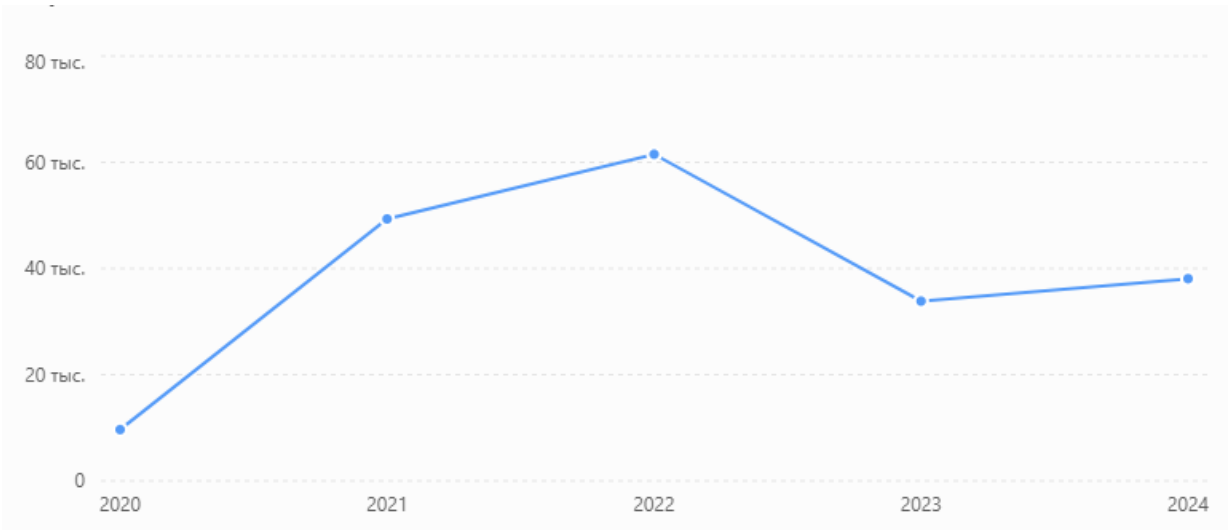


График 2.1. – Затраты на мероприятия по охране труда по республике за период 2020–2024 годы

В 2021–2022 гг. затраты на охрану труда резко выросли, достигнув 61521,3 тыс. сомони, в 2023 г. сократились до 33853,8 тыс. сомони, а в 2024 г. вновь возросли до 38079,1 тыс. сомони.

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 2.4.

Таблица 2.4. – 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	–

За 2020–2024 гг. численность работников, занятых в условиях, не отвечающих санитарно-гигиеническим нормам, снизилась с 4 891 до 4 278 чел. Динамика при этом была неустойчивой. Наименьшее значение (2 252 чел.) отмечено в 2023 г., а в 2024 г. показатель вырос почти вдвое.

Для темы исследования важнее всего динамика по шуму и вибрации. 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

2.2.1. На предприятиях машиностроения при различных видах механической обработки материалов

От чего зависит шум металлорежущего станка? Прежде всего от его конструкции и мощности приводов, а также от режима резания и того, насколько устойчиво оно протекает. На расстоянии 1 м от станка уровень звука находится в пределах 60–90 дБ(А). «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» [184]. На практике, однако, значительная часть станочного парка наших предприятий эксплуатируется давно, и это условие выполняется далеко не всегда.

Если разобрать станок на источники шума, получится примерно следующее. Зубчатые передачи главного привода и подач шумят из-за погрешностей профиля зубьев, ударов при пересопряжении, скольжения и прогиба валов. Гидросистема даёт пульсации давления, кавитационный и турбулентный шум в дросселях, вибрацию трубопроводов. Электродвигатели – электромагнитный и вентиляторный

шум, шум подшипников и дисбаланса. У прутковых автоматов и станков с ЧПУ пруток бьётся о стенки направляющей трубы. И, конечно, шумит сама зона резания: автоколебания, стружкообразование, удары кромок при фрезеровании и строгании, трение задней грани. Подшипники, ременные и кулачковые передачи, муфты вносят в общий шум сравнительно мало.

Несущая система металлорежущих станков состоит из подкрепленных ребрами жесткости пластин с технологическими отверстиями. Жесткое соединение этих элементов обеспечивает поперечную жесткость станины и корпуса, однако они становятся первичными излучателями структурного шума. В случае излучения звука при изгибных колебаниях пластин звуковая мощность W связана с коэффициентом излучения γ и эффективной амплитудой ее виброскорости $\xi^2_{\text{эфф}}$ соотношением:

$$W = \gamma \rho c \xi^2_{\text{эфф}} F, \tag{2.1}$$

где ρc −акустическое сопротивление среды;

F– площадь излучающей пластины.

Решение задачи для бесконечной пластины можно получить, определив потенциал звукового поля для верхнего полупространства ($z > 0$) в форме:

$$\Phi = e^{-ik_x x} \psi(z) e^{i\omega t}, \tag{2.2}$$

где k_i– волновое число изгибной волны на пластине;

$\psi(z)$– искомая функция, обусловливающая зависимость потенциала от координаты z.

Уравнение (2.2) удовлетворяет граничному условию при $z = 0$, определяемому наличием на излучающей пластине, расположенной в плоскости xy, плоской изгибной волны, распространяющейся в направлении оси x,

$$\xi = \xi_0 e^{i(k_x x - \omega t)}. \tag{2.3}$$

Подставляя выражение (2.2) в волновое уравнение, получим линейное дифференциальное уравнение для $\psi(z)$:

$$\frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + (k^2 - k_i^2)\psi(z) = 0, \tag{2.4}$$

откуда

$$\psi(z) = Ae^{-i\sqrt{k^2 - k_i^2}z} + Be^{i\sqrt{k^2 - k_i^2}z}. \tag{2.5}$$

Из физических соображений оставляем только волну, уходящую от излучающей пластины ($B = 0$), тогда из граничного условия при $z = 0$ получим

$$\psi(z) = \frac{\xi_0}{i\sqrt{k^2 - k_i^2}} e^{-i\sqrt{k^2 - k_i^2}z}. \tag{2.6}$$

Из полученного решения нетрудно найти коэффициент излучения

$$\gamma = \frac{I}{\frac{1}{2}\rho c \xi_0^2} = \frac{\frac{1}{2}\mathrm{Re}(pv^*)}{\frac{1}{2}\rho c \xi_0^2} = \frac{\mathrm{Re}\left(p\frac{\partial \xi^*}{\partial t} - \xi\frac{\partial p^*}{\partial z}\right)}{\rho c \xi_0^2} = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{k_i^2}{k^2}}}\right] = \mathrm{Re}\left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_i^2}\right)^{-1/2}, \tag{2.7}$$

где индекс * обозначает комплексно-сопряженные величины.

Выражение (2.7) устанавливает основную закономерность, характеризующую зависимость интенсивности излучения от частоты при изгибных колебаниях пластин. При $\lambda_i < \lambda$ коэффициент излучения $\gamma = 0$, т.е. отдача энергии в среду отсутствует. Излучение имеет место при $\lambda_i > \lambda$. При $\lambda_i \gg \lambda$, $\gamma \to 1$, а при $\lambda_i \to \lambda$ сопротивление излучения бесконечно возрастает. На критической частоте $\gamma \to \infty$, что физически в равной мере можно охарактеризовать как бесконечное возрастание интенсивности потока энергии за счет увеличения фазовой скорости. Условие $\lambda_i = \lambda$ является граничным между двумя областями частот, принципиально отличающимися по характеру излучения.

Для пластины условие $\lambda_i = \lambda$ соответствует вполне определенному значению частоты. Эту частоту определим по формуле [242]

$$f_{\text{кр}} = \frac{c^2}{\pi s}\sqrt{\frac{3\rho(1-\mu^2)}{E}}, \tag{2.8}$$

где ρ, s, E, μ– плотность, толщина, модуль Юнга и коэффициент Пуассона,

c– скорость звуковой волны,

λ– длина волны.

Формула (2.8) хорошо показывает, как излучение пластины зависит от частоты, но для расчётов реальных конструкций она слишком идеализирована. Ближе к практике другой подход – пластину представляют набором элементарных излучателей и находят потенциал поля по принципу Гюйгенса.

$$\Phi = \frac{1}{2\pi}\int_F \frac{\partial\varphi}{\partial n}\frac{e^{-ikr}}{r}\, dF, \tag{2.9}$$

где, интегрирование ведется по излучающей поверхности, а $\partial\varphi/\partial n = \xi_0 f(x,y)e^{i\omega t}$– функция распределения на ней амплитуд.

Как показано в работах [186, 187], «снижение шума станков непосредственно в источнике его возникновения достигается за счет ограничения передачи колебательной энергии от источника к элементам, излучающим шум, роль которых обычно выполняют наружные стенки станка, а также посредством демпфирования этих излучателей и проведения строительно-акустических мероприятий».

Насосы и электродвигатели для этого ставят на виброизоляторы, не допуская передачи колебаний на масляные баки – у них большие поверхности, и они хорошо излучают. Вибрацию трубопроводов гидросистемы гасят виброизолирующими креплениями и зажимами.

Заметно снижает общий шум станка виброизоляция отдельных узлов от несущей системы – если только она не ухудшает точность и жёсткость. То же касается электрошкафов: сами они не вибрируют, но их тонкие стенки, возбуждаемые станком, излучают звук. Одна только виброизоляция приводных двигателей даёт, по опыту, более 6 дБ(А).

С.П. Алексеев указывает, что «…в цехах и на участках токарных автоматов, которым свойственны высокая производительность и надежность, уровень шума при их работе несколько превышает допустимые значения» [170]. Причина – удары прутка о стенки направляющих труб. Ю.М. Ильяшук с соавторами [163, 242] пишут, что «…к настоящему времени создано значительное число конструкций малошумных направляющих труб, обеспечивающих при правильной эксплуатации и своевременной регулировке уровни шума в пределах, установленных нормами» [173], и что «…в ряде других конструкций направляющих труб снижение шума, достигающее 12 дБ (А), обеспечивается устранением ударов прутка о металлическую трубу благодаря применению виброизоляторов из резины или другого полимерного материала» [189, 190, 266].

В.А. Кудинов отмечает: «…в процессе резания уровень звука повышается на 2–3 дБ (А), что вызвано ростом нагрузки на приводы главного и вспомогательного движений, а также усилением колебаний упругой системы станка вследствие ее взаимодействия с рабочим процессом, то есть с процессами резания и трения» [191]. «Интенсивность шума при выполнении операций резания обусловлена не только скоростью, подачей и глубиной обработки, но и особенностями динамического отклика упругой технологической системы, включающей режущий инструмент и обрабатываемую деталь» [192].

«Особую нежелательность представляет тональный шум, который нередко возникает при обработке полых или тонкостенных деталей, во время выстоя инструмента, а также при снятии тонкой стружки. Интенсивность тональной составляющей достигает наибольших значений в тех случаях, когда частоты собственных колебаний режущего инструмента и обрабатываемой детали оказываются близкими друг к другу» [192]. С ним борются, повышая жёсткость инструмента и демпфируя систему «деталь – инструмент». К тонкостенной заготовке прижимают резиновые или иные демпфирующие накладки – на высоких частотах это даёт 10–15 дБ. Демпфер, встроенный в сам инструмент, убирает тональные составляющие на 20 дБ и более, а широкополосный шум снижает на 2–5 дБ на низких и на 10–15 дБ на высоких частотах.

Один из вариантов – резец с демпфированной державкой (рисунок 2.4). На державку наклеен пакет из чередующихся слоёв полиуретана и стальных пластин, а в опорах стоят проставки, чтобы резец не смещался под нагрузкой. Колебания гасятся внутренними потерями в пакете и трением между поджатыми пластинами и державкой. По той же схеме сделан демпфер расточной оправки: на борштангу с небольшим зазором надета втулка, отцентрированная жёсткими проставками, а промежутки заполнены демпфирующим материалом.

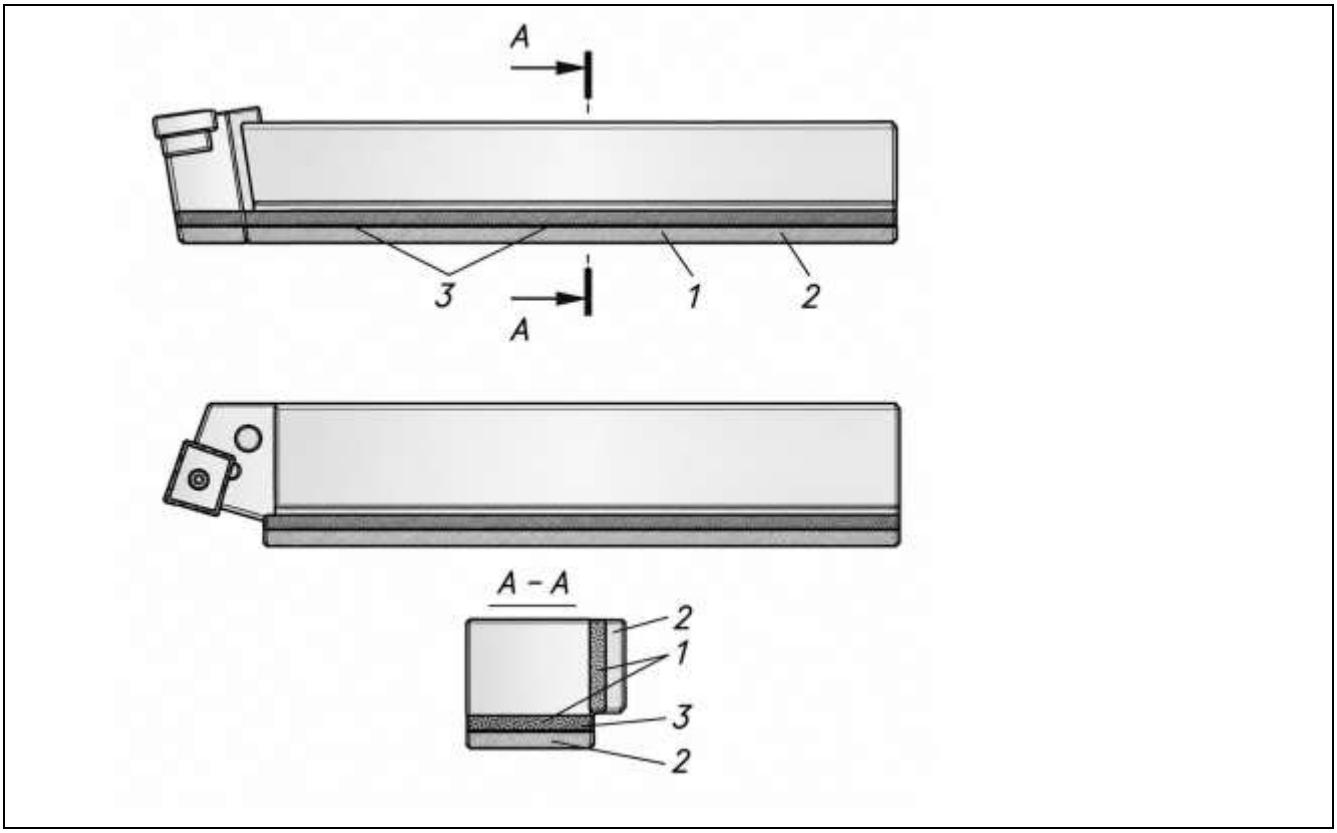


Рисунок 2.4. Пример токарного инструмента с демпфированным держателем (1 – демпфирующий материал, 2 – стальные пластины, 3 – проставки.)

Влияет на тональный шум и крепление твердосплавной пластины. В обычной державке вдоль скорости резания пластину прижимает только сила резания; стоит ей исчезнуть – при выходе инструмента или выстое, – и возможны автоколебания на 2000–4000 Гц. Предварительный натяг пластины в этом направлении их практически исключает, и тональный шум падает на 10–20 дБ.

Особенно шумны отрезные станки с дисковыми пилами: при резке лёгких металлов со скоростью до 70 м/с диск теряет устойчивость, и звуковое давление достигает примерно 115 дБ. Составные пилы отчасти демпфируются в соединениях, а цельные снабжают внешними демпферами – масляными (масло в полостях сегментов в 0,2 мм от полотна) или кольцевыми, из двух колец трёхслойного материала «сталь – полимер – сталь», приклёпанных к диску. В кольцевом демпфере энергия теряется при деформации колец и трении о полотно.

Но и так шум резания не исчезает: его создают сам отрыв стружки, трение стружки, детали и резца, движущееся поле напряжений. Поэтому зону резания закрывают подвижными звукоизолирующими кожухами. Обычный кожух из листа защищает от стружки и СОЖ, но сам гремит от ударов стружки; двухслойный кожух с вибропоглощающей прослойкой и уплотнёнными стыками снижает шум резания почти до уровня холостого хода.

Тонкие ограждения подвижных частей, жёстко прикреплённые к станку, колеблются вместе с ним и добавляют шума. Их надо отделить от корпуса виброизоляцией, а где это нельзя – закрыть шумные узлы (например, шпиндельные) отдельными панелями на виброопорах. Выигрыш – 10 дБ(А) и более, и ещё больше, если кожух герметичный, многослойный и облицован изнутри.

О.В. Берестиев указывает: «Шум зубчатых передач обусловлен колебаниями самих колес, а также сопряженных с ними элементов конструкции. К числу причин, порождающих эти колебания, относятся взаимное соударение зубьев в момент входа в зацепление, переменная деформация зубьев, вызванная непостоянством приложенных к ним сил, кинематические погрешности зубчатых колес и переменные силы трения» [178]. Спектр шума передач широкий, с максимумом в области 2000–5000 Гц; на сплошном фоне выделяются дискретные составляющие от пересопряжения зубьев и кинематических погрешностей и их гармоники.

«Составляющие вибрации и шума от деформации зубьев под нагрузкой имеют дискретный характер с основной частотой, равной частоте пересопряжения зубьев,

$$f_z = zn/60, \qquad (2.10)$$

где z – число зубьев колеса;

n – частота вращении, об/с.

Частота действия накопленной ошибки зубчатого колеса кратка частоте вращения:

$$f_i = in/60, \qquad (2.11)$$

где i – 1, 2, 3 ...» [193].

К этому добавляются погрешности изготовления и монтажа – несоосность валов, неточность межосевого расстояния, искажения профиля. Собственных частот у зубчатой передачи много, и в некоторых режимах неизбежны резонансы с резким ростом шума.

Как снижают шум передач? Уменьшают возмущающие силы, повышают импеданс в точках их приложения, затрудняют передачу вибрации к излучающим поверхностям и сокращают их площадь, применяют материалы с повышенным внутренним трением. Если требования к шуму высоки, вместо стальных колёс используют неметаллические – раньше деревянные и кожаные, теперь текстолитовые, древесно-полимерные, капроновые, а также резиновые, ресурс которых зависит от эластомера, конструкции и технологии [291].

В работах [186, 193, 194] отмечается: «Исследования и практический опыт эксплуатации показали эффективность применения упругих зубчатых колес, а также конструкций с внутренней виброизоляцией, в которых используются гибкие резиновые соединительные элементы. В таких системах эластичность конструкции обеспечивается размещением резиновых вставок между ступицей и зубчатым кольцом колеса». Радиальные и ударные нагрузки при входе зубьев в зацепление при этом снижаются, а виброакустическая эффективность передачи растёт.

Б.И. Климов отмечает, что «…в редукторах источником формирования виброакустических факторов выступают ограждающие конструкции. Порождаемый зубчатыми передачами шум через воздушный промежуток и

ограждения проникает в окружающее пространство, образуя воздушный шум» [179]. Пути распространения структурного и воздушного шума в корпусах закрытых зубчатых передач (редукторов) показаны на рисунке 2.5.

Вибрация от передач доходит по деталям, опорам и соединениям до стенок корпуса редуктора, и корпус начинает излучать сам. Технологические отверстия для контроля и смазки и зазоры ухудшают звукоизоляцию и выпускают наружу воздушный шум.

Таким образом, шум редуктора – это структурный шум колеблющегося корпуса плюс воздушный шум, проходящий через отверстия и зазоры. Б.И. Климов выделяет общие акустические черты коробок передач:

«– зубчатые передачи и ограждающие конструкции размещаются на общей станине;

– кожухи отличаются небольшими габаритами, а внутренняя воздушная полость редукторных систем принадлежит к классу «малых» акустических объемов, размеры которых меньше длины волны в области низких и средних частот;

– ограждающие конструкции жестко связаны с металлическими опорными конструкциями;

– общий уровень излучаемого редукторными системами шума определяется уровнем шума, излучаемого тонкостенными крышками ограждений;

– обычно размеры излучающих ограждений соизмеримы с расстояниями до зон, в которых находится обслуживающий персонал» [179].

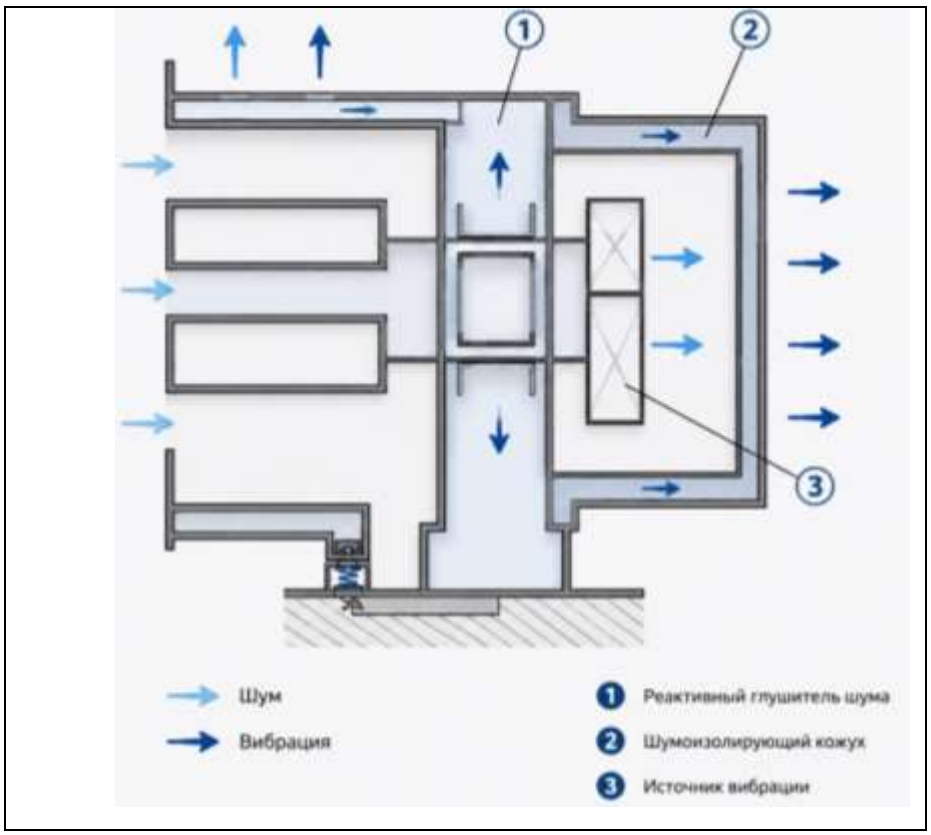


Рисунок 2.5. – Пути передачи звука и вибрации к корпусам редуктора

Возмущения в кулачковых механизмах создают технологические силы рабочей операции, силы трения в контактах, инерционные и ударные нагрузки, зависящие от закона движения кулачка, и динамические воздействия от погрешностей изготовления и сборки. Первые три группы закономерны, последняя случайна и меняется по мере износа.

Исследования показывают, что «…применение синусоидальных, параболических и полиномиальных законов периодического движения позволяет существенно уменьшить вибрацию и шум кулачковых механизмов, тогда как законы постоянного, равноубывающего ускорений, а также косинусоидальный и трапецеидальный законы приводят к формированию более широкополосных колебаний. Качество изготовления профиля кулачка оказывает существенное влияние на формирование виброакустических характеристик механизма, поскольку отклонения геометрии рабочей поверхности, возникающие в процессе обработки,

совместно с материалом ролика и режимами эксплуатации определяют интенсивность возбуждаемых колебаний» [195].

Поэтому шум кулачкового механизма снижают прежде всего качеством рабочих поверхностей: рациональной обработкой профиля, выглаживанием, материалами с высоким демпфированием; ударные нагрузки уменьшают ролики на подшипниках качения и правильная форма профиля.

В подшипниках качения вибрацию порождают погрешности изготовления и монтажа – разнотолщинность колец, овальность и разноразмерность тел качения, волнистость дорожек, зазоры между кольцами, телами качения и сепаратором.

Даже точный подшипник вибрирует – детали упруго деформируются, тела качения проскальзывают, внутри движется воздух. Основная энергия вибрации сосредоточена между частотой вращения вала (f0) и примерно 3000 Гц, хотя спектр простирается до десятков килогерц; ошибки монтажа и плохая смазка резко увеличивают шум. Подшипники скольжения тише, но при нехватке смазки шейка трётся о вкладыш, а в радиальных подшипниках с напорной или самовсасывающей подачей при малой нагрузке вихревое течение смазки может раскачать вал.

Хорошо помогают упругодемпфирующие вкладыши опор из металловолокнистых композиций, эластомеров и полимеров: они выравнивают погрешности посадки и изолируют корпус, снижая шум на средних и высоких частотах на 12–15 дБ.

2.2.2. Источники виброакустических факторов на предприятиях горнорудной промышленности

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.

Таблица 2.5. – Шумовые характеристики дробилок

Тип дробилки	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц								Уровни звука, дБ(А)
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Холостой ход									
ККД 1500/180	83	85	84	84	81	74	65	54	85
КМД– 1750	86	84	84	84	82	77	71	62	86
КМД–2200	89	89	88	87	85	79	72	60	89
КМД–3000 Т	79	80	84	81	78	68	63	53	82
КМД–2200	76	81	81	80	81	69	65	56	83
Дробление									
КМД 1500/180	98	96	94	94	93	88	82	76	97
КМД–1750	91	89	91	92	91	89	84	77	96
КМД–2200	92	94	95	94	94	90	83	73	98
КМД–3000 Т	93	92	94	95	91	84	75	66	95
КМД–2200	97	98	98	100	98	95	85	73	102

Составлено на основании ГОСТ 12.1.003-2014 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности»

Шум дробилок снижают, ослабляя передачу вибрации к излучающим элементам: резиновыми прокладками под бронеплитами, виброизоляцией привода, балансировкой вращающихся узлов. Оператора целесообразно размещать в звукоизолированной кабине.

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 [199, 200].

2.2.3. Источники формирования виброакустических факторов на предприятиях металлургической промышленности

Металлургические предприятия широко используют 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.

Согласно нормам «…исходя из принципа действия, назначения и характера основных источников шумообразования, кузнечно-прессовое оборудование подразделяют на несколько групп, а именно на прессы механические и гидравлические, кузнечнопрессовые автоматы, молоты, а также прочие машины, к числу которых относятся ковочные, гибочные и правильные агрегаты, ножницы и другое оборудование» [201].

Э.Д. Вервекин, В.В. Гусев и В.И. Кузнецов отмечают, что «…основным источником шума, излучаемого механическим прессом, служат колебания его станины и маховика, возникающие вследствие ударов во всех подвижных сочленениях пресса. Такие удары проявляются в момент включения и в начальной фазе движения кривошипно-шатунного или эксцентрикового механизма, когда происходит выборка люфтов в сопряжениях шатуна с шейкой рабочего вала и ползуном, а также в подшипниках рабочего вала. Ударный характер носит и процесс взаимодействия штампа с заготовкой, причем при штамповке уровни звука прессов заметно повышаются, возрастая на 4–10 дБА» [187].

Шум кузнечнопрессового оборудования снижается при замене ударной штамповки прессованием без ударных нагрузок. На рабочих местах гидравлических прессов уровень звука составляет 90–96 дБ(А), у механических 100–110 дБ(А). При этом отдельные гидравлические прессы для одно- и двухпозиционной листовой штамповки усилием до 31,5 МН создают шум до 106 дБ(А).

Шум гидравлических прессов снижают модернизацией вспомогательного оборудования и оптимизацией технологических процессов. Сильнее всего на акустику влияют гидросистема и устройства подачи и удаления заготовок. Насосные агрегаты целесообразно выносить в отдельные звукоизолированные камеры или закрывать шумозащитными кожухами. Вибропоглощающие покрытия и звукоизоляция трубопроводов гидросистемы дополнительно снижают структурный и воздушный шум и ограничивают распространение колебаний по конструкции [290].

Прессы широко применяют и для холодной высадки мелких деталей, которая относится к самым производительным технологиям обработки металлов давлением. Однако прессы-автоматы этого типа создают высокий шум. В зоне обслуживания уровни звука обычно составляют 97–108 дБА. Даже несколько таких машин способны заметно ухудшить акустическую обстановку и на участке, и в соседних помещениях, поэтому необходим комплекс инженерных мер.

Снизить шум кузнечнопрессовых автоматов непосредственно в источнике сложно из-за особенностей технологии и конструкции. Тем не менее в современном машиностроении созданы прессовые автоматы с улучшенными виброакустическими характеристиками. Усовершенствованные кинематические схемы, оптимизированные ударные механизмы, демпфирующие элементы и виброизоляция заметно снижают шум уже на стадии его возникновения. Новые кинематические решения улучшили, в частности, гвоздильные автоматы. В усовершенствованной конструкции уровень шума на рабочем месте не превышает

80 дБА. Акустическое поле такого оборудования складывается из нескольких независимых источников: механизмов ввода заготовки, зажима, заточки и подачи.

Шум гвоздильного автомата порождают высокие ударные нагрузки в кинематических парах и при контакте инструмента с заготовкой; интенсивность излучения определяется динамикой соударений. Поэтому при проектировании малошумного оборудования стремятся снизить скорость удара и увеличить интервал между ударами. Например, уменьшение радиуса кривошипа заготовочного механизма снижает скорость удара инструмента в 2,5–3 раза, а уровень звукового давления в критическом диапазоне частот на 7–9 дБ.

В механизмах зажима и заострения шум создают в основном зубчатые передачи из-за динамических нагрузок при зацеплении. Теоретически шум можно снизить, повысив точность изготовления колёс, что ослабит удары и сделает движение более плавным. Однако довести зубчатые передачи гвоздильных автоматов до требуемой 7-й степени точности технологически сложно и экономически не всегда оправдано. Рациональнее отказаться от зубчатых передач в этих механизмах и заменить их другими кинематическими решениями с лучшими виброакустическими характеристиками.

В.И. Заборов, Л.Н. Клячко и П.И. Шигорин считают, что «…при модернизации действующих производств эффективным средством уменьшения шумового воздействия на участках холодной высадки является применение звукоизолирующих кожухов. Конструкция таких кожухов должна обеспечивать свободный доступ к оборудованию для его технического обслуживания и ремонта, поэтому со стороны подачи проволоки предусматривается частично открытое исполнение, позволяющее сохранить технологическое удобство при одновременном снижении уровня производственного шума» [188]. При проектировании цехов холодной штамповки их рекомендуется отделять от основных производственных и вспомогательных помещений звукоизолирующими перегородками. Прессовое оборудование целесообразно группировать в секции по

4–6 единиц, ограниченные звукоизолирующими экранами высотой около 3 м с облицовкой внутренних поверхностей звукопоглощающими материалами. Звукопоглощающая отделка стен и потолка дополнительно повышает акустическую эффективность.

Шумовую нагрузку на персонал метизных предприятий снижает и автоматизация технологических процессов. Дистанционное управление оборудованием и удалённый контроль сокращают время пребывания операторов в зоне повышенного шума, поскольку основная часть производственного цикла контролируется из звукоизолированных постов наблюдения.

Сильнее всего импульсный шум в ковочных и прессовых машинах усиливает износ паровых и пневматических молотов. Шум возникает при ударе бабы молота по штампу и заготовке, когда высвобождается динамическая энергия. Чем больше масса подвижных частей молота, тем ниже по частоте смещается максимум звукового давления, поэтому тяжёлые ковочные и штамповочные молоты создают особенно высокий шум. Уровни звука на рабочих местах вблизи них обычно составляют 110–120 дБА, что существенно выше санитарно-гигиенических нормативов.

Р.А. Медведь и Р.В. Соловьёв 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» [174].

Существенным недостатком кузнечнопрессовых молотов является передача мощных ударных нагрузок через фундамент на строительные конструкции здания.

Вибрация, распространяясь по несущим элементам, повышает структурный и воздушный шум в помещении с оборудованием, а иногда и в соседних зданиях. Поэтому молоты виброизолируют с помощью специальных виброизолирующих фундаментов и других инженерных решений, гасящих вибрацию, идущую по строительным конструкциям.

Горизонтально-ковочные машины создают широкополосный шум с основной энергией в низко- и среднечастотной областях. С уменьшением диаметра матрицы максимум смещается к более высоким частотам. Шумовое поле формируется в основном периодическими ударами при смыкании матриц и выбросом сжатого воздуха из пневмосистемы. Методы снижения шума здесь те же, что и для механических прессов: виброизоляция, звукоизоляция, шумопоглощение. Прессовые ножницы, обжимные станки и обрезные прессы, в отличие от оборудования ударной ковки и прессования, работают без ударов по заготовке и импульсного шума не создают.

Наиболее высокий шум среди металлургических производств создаёт прокатное. При производстве блюмов, слябов и заготовок шум создают соударения сталкивателей со слитком, слитков – с роликами транспортного рольганга, валками обжимной клети и манипуляторами; обрезка слитков ножницами и удары обрезанных концов о конвейер; электроприводы роликов рольганга, обжимной клети и др. Уровни звукового давления здесь составляют 66–120 дБ. Шум преимущественно низко- и среднечастотный. При прокатке блюмов ударный шум достигает 103 дБ.

В машинных залах прокатных станов агрегаты создают интенсивный шум с максимумом в октавной полосе 250 Гц. Поскольку здесь же обычно размещается электропривод блюминга, общий уровень звукового давления достигает 90–100 дБ [205].

При горячей и холодной прокатке листа интенсивный шум создают прежде всего прокатные станы. При горячей прокатке среднечастотный шум создаёт

движение горячей полосы по транспортному рольгангу. Сбив окалины водой под давлением порождает низкочастотный шум; низкочастотен и шум обжатия полосы в чистовой клети дуо. При смотке горячей полосы в рулон уровень звукового давления составляет 90 дБ. Если рядом установлены две моталки, высокочастотный шум не прекращается всю смену. Кратковременный высокочастотный шум до 95 дБ создают электропневматические реле, управляющие пневмоцилиндрами моталок.

В цехе холодной прокатки листовой стали наиболее высокий шум создаёт непрерывно-травильный агрегат. Уровень звукового давления при его работе доходит до 98 дБ. Шум создают движущийся металлический лист и вентиляторы сушки листа.

Исследования в цехах холодной прокатки с четырёхклетевым непрерывным станом 1700 и пятиклетевым непрерывным станом 1200 показали, что на участке непрерывно-травильного агрегата при размотке рулонов возникает высокочастотный шум до 102 дБ. На выходе конца полосы, из-за частых ударов конца по роликам рольганга, уровень звукового давления растёт до 107 дБ.

Характеристики шума в цехе холодной прокатки листовой стали с четырёхклетевым непрерывным станом 1700 приведены в таблице 2.10 и на рисунке 2.6.

Следует учесть, что разносторонний изгиб полосы при поступлении в окалиноломатель вызывает высокочастотный шум. Движение холодной полосы по рольгангу является источником высокочастотного шума на участке непрерывного травления полосы. Шум, возникающий вследствие трения металла о металл и соударения полосы с поверхностью роликов, зависит от скорости движения полосы.

Таблица 2.10. – Шумовая характеристика в цехе холодной прокатки листовой стали с четырехклетевым непрерывным станом 1700

Агрегат (механизм)	Операция, выполняемая при нагрузке	Операция, выполняемая при отсутствии нагрузки	Уровень звукового давления, дБ	Класс и характер шума при нагрузке агрегата
Разматыва-тель	Размотка рулона	Отгибание конца рулона, задача конца полосы в правильную машину	100/84	Высокочастотный, прерывистый
Окалиноло-матель	Разносторонний изгиб полосы	Работает окружающее оборудование	101/84	Высокочастотный, прерывистый
Рольганг перед стыкосварочной машиной	Движение полосы по рольгангу	Работает окружающее оборудование	98/91	Высокочастотный, прерывистый
Стыкосварочная машина	Сварка встык заднего конца предыдущего рулона и переднего конца последующего	Работает окружающее оборудование	91/84	Среднечастотный, кратковременный
Тянущие ролики	Движение полосы через травильный агрегат	–	99	Среднечастотный, постоянный
Моталка	Сматывание полосы в рулон	–	92	Низкочастотный, постоянный

Тянущие ролики у входа полосы в травильную ванну работают непрерывно, поэтому шум в течение смены постоянен; уровень звукового давления при их работе достигает 99 дБ.

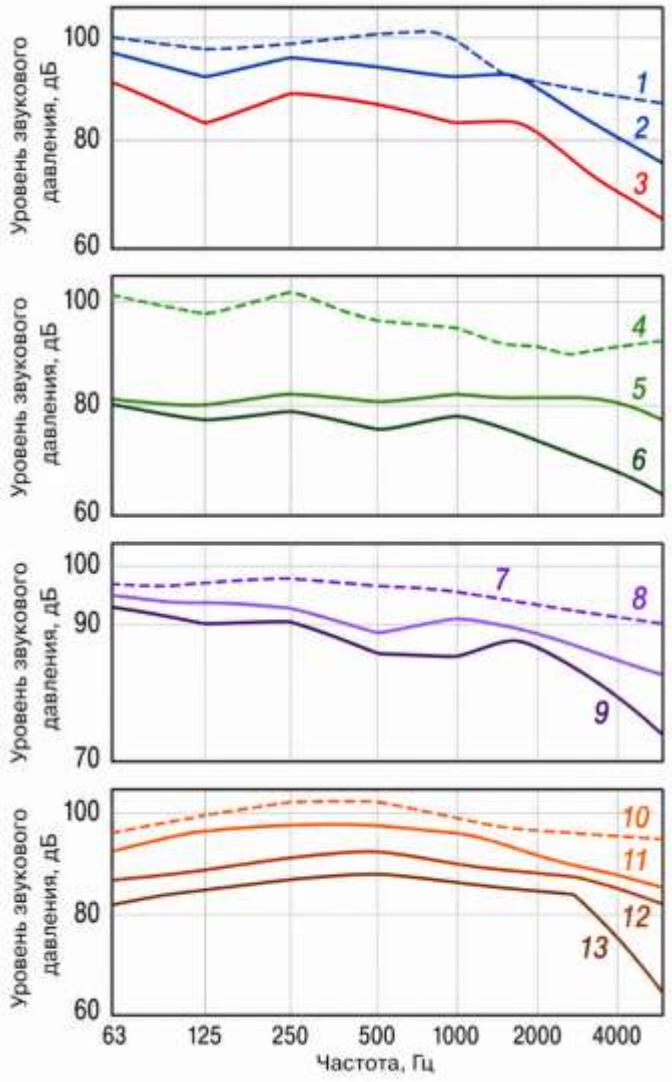


Рисунок 2.6. – Частотные спектры шума на непрерывном листовом стане 1700 при работе

1 – рольганга; 2 – окалиноломателя; 3 – стыкосварочной машины; 4 – дисковых ножниц; 5 – тянущих роликов; 6 – концевой моталки; 7 –барабанной моталки; 8 – четырехклетевого прокатного стана; 9 –разматывателя; 10 – конусного разматывателя; 11 – правильной машины; 12 – летучих ножниц; 13 – листоукладчика.

На выходной части травильного агрегата высокочастотный шум создаёт кромкокрошитель. При сматывании полосы в рулон возникает низкочастотный шум с уровнем звукового давления 92 дБ.

На участке холодной прокатки уровни звукового давления и спектр шума во многом зависят от скорости прокатки. В начале процесса она растёт до рабочей, затем снижается.

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 (толщине) [292]. 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» [206, 207].

На непрерывных травильных и холоднопрокатных агрегатах шум возникает при изгибе и движении полосы, трении и ударах металла о ролики, работе технологического оборудования. Уровень шума зависит прежде всего от скорости полосы и режима работы агрегатов и может достигать 99 дБ. Снизить виброакустическое воздействие позволяют автоматизация шумных операций, выбор малошумного оборудования и совершенствование технологических режимов обработки металла, что повышает безопасность и улучшает условия труда.

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

ОАО «Таджикская алюминиевая компания» (ОАО ТАЛКО) – единственный в Таджикистане производитель первичного алюминия, предприятие полного цикла с электролизным комплексом, цехом обожжённых анодов, литейным отделением и вспомогательными службами (транспортные цеха, ремонтные службы, склады, полигон отходов). Электроэнергию оно получает от Нурекской ГЭС по ЛЭП 500 кВ, электролиз ведётся в 10 корпусах (6 на 175 кА, 4 на 160 кА), проектная мощность – 517 тыс. тонн в год.

Исходное сырьё – глинозём (Al_2O_3), растворённый в расплаве криолита (Na_3AlF_6), то есть смеси фторидов натрия и алюминия ($3NaF \cdot AlF_3$).

При 958–962 °C постоянный ток разлагает глинозём: алюминий выделяется на катоде, кислород – на угольном аноде. Электролизный комплекс включает электролизный цех, цех фтористых солей и участок обслуживания машин. В рамках «Программы ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 годы» на предприятии ведётся модернизация, выпуск алюминия растёт (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7. – Динамика объема производства алюминия на 2021–2025 годы

Вместе с тем, как отмечено на Пресс-релизе ОАО ТАЛКО «…на возможность достижения компанией более значимых результатов в плане увеличения объемов производимой продукции оказывает сложная геополитическая ситуация, связанная с эскалацией конфликта между Россией и Украиной, а также введенными санкциями на рынке сырья. В частности, прекратилась поставка в ТАЛКО основного сырья из Николаевского глиноземного завода, расположенного на Украине, из–за полной остановки его деятельности. Предприятия Австралии, производящие глинозем, перестали экспортировать свою продукцию в Россию, вследствие чего компания РУСАЛ стала закупать недостающий глинозем в Казахстане (Павлодар), а это, в свою очередь, привело к снижению поставок казахского глинозема в Таджикистан. Аналогичная ситуация сложилась и в отношении нефтяного кокса, который России из–за введенных против нее санкций также приходится приобретать в странах Центральной Азии, что повлияло на значительное сокращение поставок этого сырья на ТАЛКО из Казахстана и Туркменистана, а также привело к увеличению его цены от 200% до 300%. Для поддержания стабильности технологического процесса компания была вынуждена увеличить использование вторичного сырья при производстве анодов, тем самым понижая сортность алюминия» [190]. Кроме того, производство алюминия связано с экологическими рисками и негативным воздействием на окружающую среду и здоровье персонала [192, 210].

Производство алюминия энергоёмко, связано с интенсивной работой цехового транспорта и грузоподъёмных механизмов, использует сырьё разных классов опасности. За весь период эксплуатации параметрические, технологические и организационные режимы работы предприятия непрерывно меняются [191].

Опасные и вредные производственные факторы на ОАО ТАЛКО сопутствуют всем стадиям основного и вспомогательного производства.

По физической природе, интенсивности, продолжительности воздействия и тяжести эти факторы различны. Для оценки условий труда на алюминиевых заводах

широко используют метод сравнительного анализа профессиональных рисков [191, 209].

Таблица 2.11. – Опасные и вредные производственные факторы на ГУП «Талко»

Источники	Опасные и вредные производственные факторы	Воздействие на организм работников
Склад глинозема, бункеры и погрузочные устройства для вилочных погрузчиков, электролизеры, погрузчики, литейная машина, протекающая крышка ячейки, использование самозапекающихся анодов, неадекватная система вентиляции, отсутствие увлажнения воздуха	Выброс вредных химических веществ в воздух рабочей зоны, увеличение газового и пылевого загрязнения (сублиматы каменноугольной смолы и битума, бенз(а)пирен), CO, CO2, Al2O3, HF, NaF, AlF3, Na3AlF6, углерода пыли)	Острые и хронические интоксикации: головокружение, головная боль, тошнота, раздражение слизистых оболочек верхних дыхательных путей. Заболевания органов дыхания: поражения передних дыхательных путей, бронхит, легочный алюминоз и пневмокониоз. Специфические системные нарушения: флюороз (отложение фтора в костной ткани), изменение состава крови и расстройства центральной нервной системы. Отдаленные последствия: повышение риска развития онкологических заболеваний.
Электролизеры, вакуумные ковши, смесители, отражательные печи	Повышение температуры поверхности оборудования	Ожоги различной степени тяжести
Здание не утеплено, нет отопления	Снижение температуры воздуха в рабочей зоне	Озноб, простудные заболевания, невриты, радикулиты
Технологическое оборудование: электролизеры, отражательные смесительные печи и литейные машины, функционирующие при высоких температурах.	Интенсивное тепловое излучение, повышение температуры воздуха	Водно-электролитные нарушения: повышенное потоотделение, обезвоживание организма и нарушение водно-солевого баланса.
Конструктивные и эксплуатационные недостатки: разгерметизация (неплотность) крышек электролизных ячеек, отсутствие эффективных систем принудительного охлаждения и нерациональная организация	Интенсивное тепловое излучение, повышение температуры воздуха	Расстройства сердечно-сосудистой и нервной систем: снижение артериального давления, вялость, сонливость, судороги и функциональные нарушения сердечно-сосудистой деятельности.

аэрации производственных помещений.		Острые и хронические состояния: хронический тепловой стресс и тепловой удар.
Электролизеры, технологические машины, загрузочные машины, литейные машины, насосы, электродвигатели	Повышенный уровень шума и вибрации	Раздражение, головная боль, сердечно-сосудистые заболевания, кохлеарный неврит, потеря слуха
Электролизеры, работающие при высоком постоянном токе.	Постоянные магнитные поля, повышенный уровень	Нарушения работы иммунной, сердечно-сосудистой, нервной, дыхательной и пищеварительной систем.
Неудобная рабочая поза, наклон тела и движущаяся нагрузка.	Тяжесть производственных процессов	Усталость, повреждения опорно-двигательного аппарата.
В технологической цепочке присутствуют находящиеся под напряжением электротехнические компоненты, корпуса электрооборудования и трансформаторы, что приводит к снижению тока.	Электрический ток	Электротравмы (поражение электрическим током, ожоги от электричества, следы или отметины от электричества, металлизация кожи, механические повреждения)
Контакт с расплавами: разбрызгивание электролита, аварийный прорыв жидкого металла или электролита из футеровки электролизера. Взрывные явления: выбросы расплава при контакте жидкого металла или электролита с влагой. Транспортировка: падение или опрокидывание ковшей с высокотемпературными расплавами при подъемно-транспортных операциях. Эксплуатация оборудования: соприкосновение кожи с раскаленным технологическим инструментом и оснасткой.	Воздействие тепла от раскаленного металла	Ожоги
Взрывоопасность и риски поражения электрическим током при нарушениях технологического процесса	Повышенная пожарная опасность	Пожароопасность, которая может привести к травмам или ожогам.
Грузоподъемное и напольное транспортное оборудование: мостовые краны и вилочные погрузчики. Специализированные	Движущиеся машины и механизмы	Механические травмы, летальный исход

технологические машины: станки для пробивки электролитной корки, машины автоматизированной подачи и дозирования оксида алюминия (A_l2O_3), а также оборудование для профилирования напольных направляющих. Открытые вращающиеся элементы механизмов: приводы, валы, маховики и соединительные муфты.		
Человеческий фактор: ошибочные действия и нарушения инструкций по охране труда со стороны обслуживающего персонала. Технический фактор: конструктивные дефекты, износ и внезапные неисправности механизмов технологического оборудования.	Падающие предметы и материалы с высоты	Механические травмы, потеря сознания, смерть

Составлено на основании ПРЕСС–РЕЛИЗ по итогам деятельности ОАО «Таджикская алюминиевая компания» в первом полугодии 2024 года.

Наибольшая доля опасных и вредных производственных факторов (46,2 %, почти половина от общего числа) приходится на электролизное производство (рисунок 2.8), которое в значительной мере определяет состояние безопасности труда на предприятии в целом.

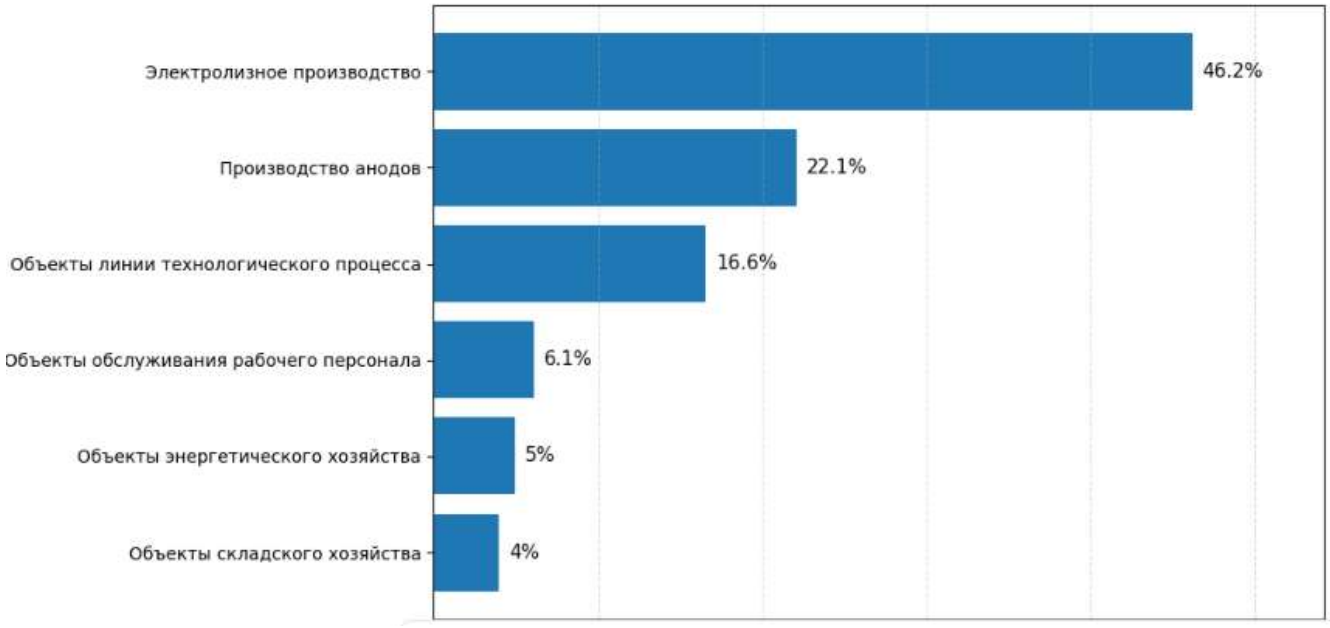


Рисунок 2.8. – Диаграмма удельного веса источников опасных и вредных факторов на производствах ОАО ТАЛКО

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» [210].

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 2.9).

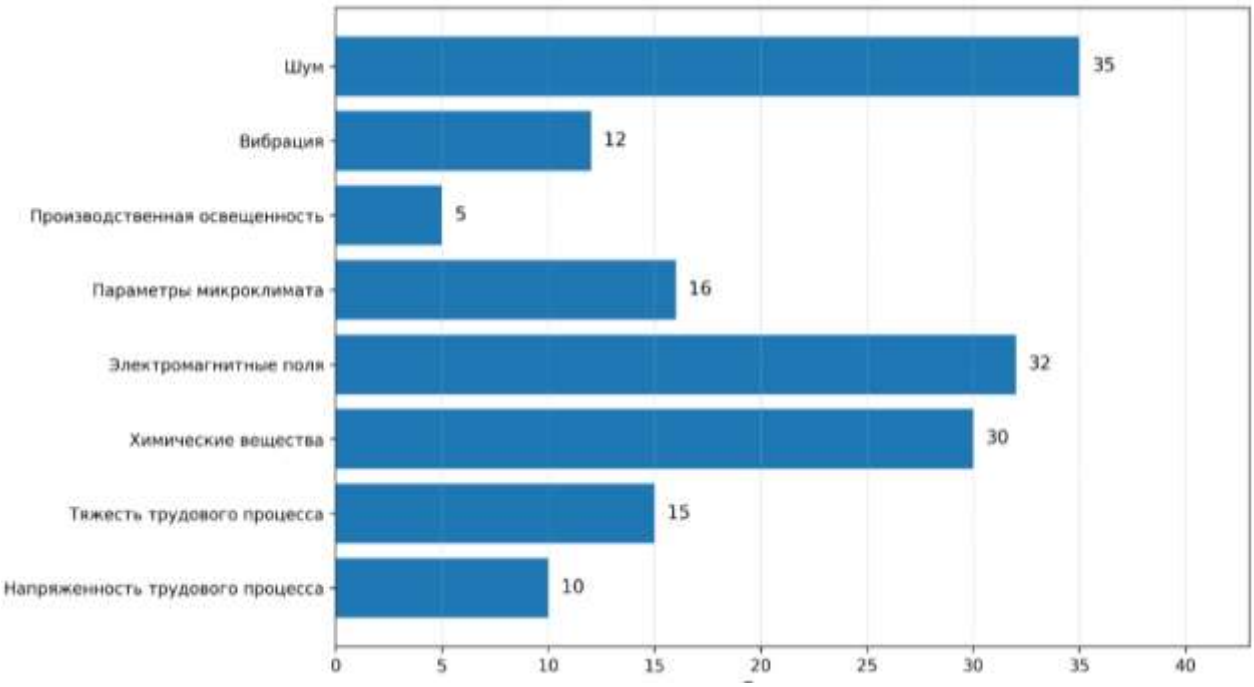


Рисунок 2.9. Диаграмма удельного веса условий труда по факторам производственной среды и трудового процесса на ГУП «Талко»

Как видно из рисунка 2.9, 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.

Сотрудники Службы регулярно информируют инженерно-технический персонал и рабочих о требованиях действующих отраслевых норм и разъясняют их,

в том числе требования «Правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом», «Единых правил охраны недр при добыче твёрдых полезных ископаемых», «Единых правил безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом», «Единых правил безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окусковании руд и концентратов», «Единых правил безопасности при взрывных работах» и других.

Согласно отраслевым правилам, все вновь принятые работники проходят обучение технике безопасности; на предприятии регулярно проводятся вводный, первичный на рабочем месте, повторный, внеплановый и целевой инструктажи.

Руководители и специалисты раз в три года сдают экзамен комиссии Государственной службы по контролю за безопасностью в промышленности и горнодобывающей отрасли при Правительстве Республики Таджикистан. Работники, имеющие дело со взрывчатыми материалами, проходят проверку перед экзаменационной комиссией Службы раз в 2 года. Остальные работники ежегодно аттестуются постоянной экзаменационной комиссией предприятия.

Для оказания первой медицинской помощи на предприятии есть медицинский центр, обеспеченный необходимым оборудованием, расходными материалами, медикаментами и служебным автомобилем. Производственные травмы регистрируются и учитываются согласно Порядку расследования и регистрации производственных травм и профессиональных заболеваний, утверждённому Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 5 июля 2014 года № 462.

Для предотвращения и своевременной ликвидации аварий на предприятии на основании законов Республики Таджикистан и действующих нормативов работают штаб гражданской обороны и пожарная служба, оснащённые спасательным и вспомогательным оборудованием. Всё технологическое оборудование проходит экспертизу промышленной безопасности с регистрацией в государственном реестре

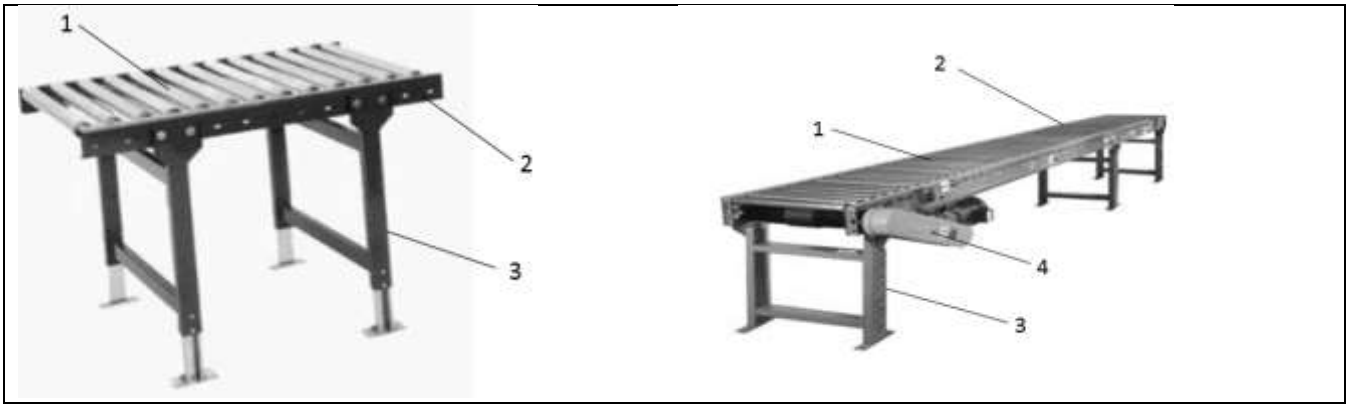
согласно Закону Республики Таджикистан «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Для дальнейшего улучшения условий труда на ОАО ТАЛКО Службе охраны труда и техники безопасности стоит опереться на накопленный опыт: предотвращать несчастные случаи, защищать работников от виброакустических факторов и выстроить действенную систему управления охраной труда, отвечающую законодательству Республики Таджикистан и международным нормам.

2.4. Моделирование процесса формирования виброакустических факторов ударно–вибрационного происхождения при транспортировке сырья и материалов на рольгангах

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). Конструкция современных рольгангов показана на рисунке 2.10 [198]. Ролики выполняют бесприводными и приводными, с групповым или индивидуальным приводом.



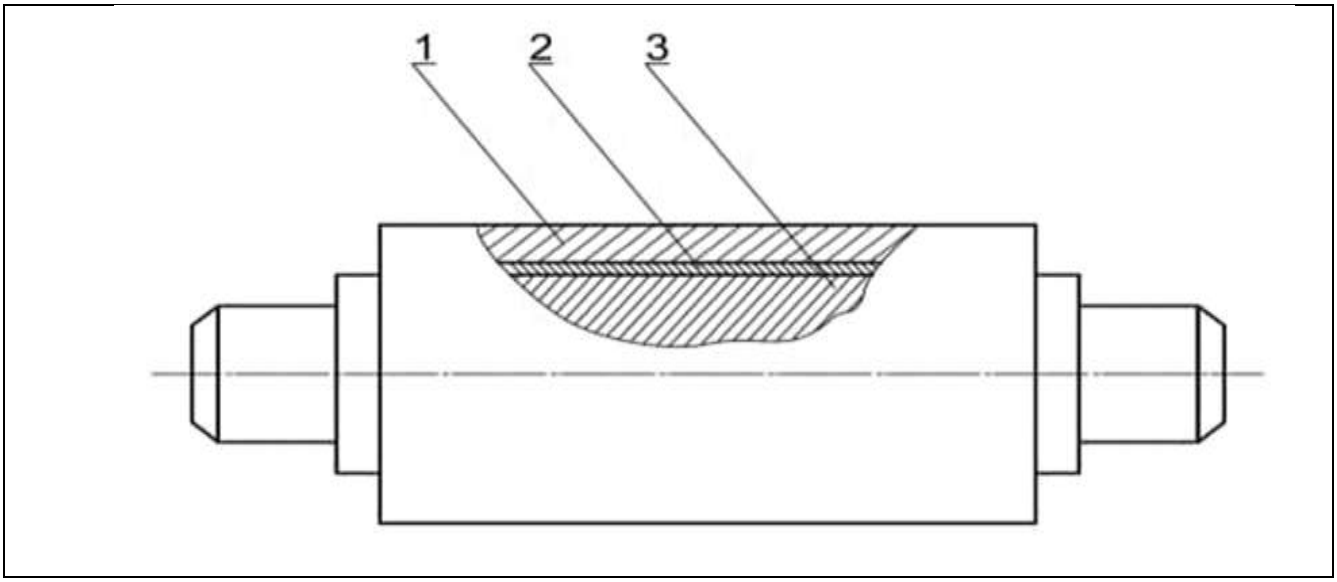
а) б)

Рисунок 2.10. – Рольганги: а) бесприводной; б) приводной

Примечание: 1 – ролик; 2 – несущая система роликов; 3 – опорная стойка; 4 – привод.

В реверсивных рольгангах с групповым приводом вращение от двигателей постоянного тока передаётся через конические шестерни; скорость регулируется, привод допускает частые пуски. Ролики 1 установлены на раме 2, опирающейся на стойки 3, и приводятся от привода 4 (рисунок 2.10); для тяжёлых заготовок их делают цельнокованными [194], для лёгких – с приварными цапфами или из труб. Ролики защищают бандажами, бочки покрывают резиной или полимером; от ролика требуются надёжность, долговечность и способность гасить вибрацию [196, 197].

Известные решения (демпфирующие слои из ниобия [196] или резины с полиамидной тканью [197]) 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 [198] (рисунок 2.11), который в сравнительных испытаниях единственный обеспечил снижение шума до санитарной нормы.



Примечание: 1 – наружная часть ролика, 2 – промежуточный слой из вибродемпфирующего материала, 3 – бочка ролика

Рисунок 2.11. – Ролик рольганга

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 [200, 201]; в одном из них ролик рассматривают как цилиндрический излучатель соизмеримых длины и диаметра (рисунок 2.12) [200].

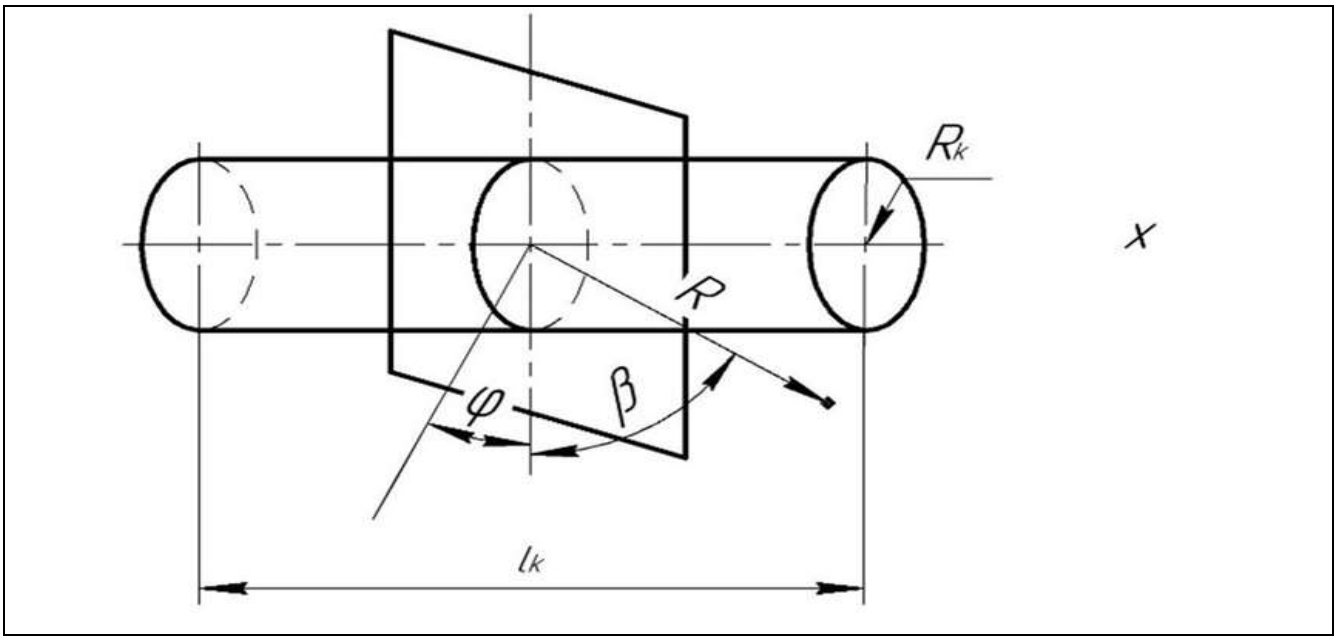


Рисунок 2.12. – Расчетная схема ролика рольганга как цилиндра ограниченной длины

Уровень звукового давления источника шума определяется по известной формуле [222]:

$$L_P = 20lg\frac{P}{2*10^{-5}} \qquad (2.12)$$

Для расчёта уровня звукового давления в рольганговых механизмах за исходное выражение принята зависимость звукового давления [219, 220, 293]:

$$P = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\rho_0 c_0}{R}\,\frac{B(ksin\beta)}{cos\beta H'(kR_k cos\beta)} \qquad (2.13)$$

$$B_{m_r}(k_0 in\beta) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1.5} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\upsilon(\varphi, x)\exp - i(\varphi + k_0 sin\beta))d\varphi dx \qquad (2.14)$$

где ρ_0 – плотность воздуха, кг/м3;

c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; k_0 – волновое число, м–1;

β – угол излучения;

β – расстояние от центра источника до расчетной 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 задано в следующем виде:

$$\upsilon(\varphi, x) = \begin{cases} \upsilon_k \ cxpi\varphi & \text{при } x \le |l_k| \\ 0 & \text{при } |l_k| > x \end{cases} \qquad (2.15)$$

где l_k – длина ролика, м.

Поставляя зависимости (2.13) в выражение (2.14) получено выражение $B(ksin\beta)$ в виде:

$$B_k = \frac{\upsilon_k l_k}{\sqrt{2\pi}} \Phi(\beta), \Phi(\beta) = \frac{sin^{\frac{kl_k}{2}} sin\beta}{0.5 kl_k sin\beta} \qquad (2.16)$$

Для расчета звукового давления с учетом производной функции Ганкеля были получены следующие соотношений $kR_k cos\beta \le 1$ и $kR_k cos\beta > 1$.

$$\frac{2\pi f_k}{c_0} R_k \, cos\beta = 0.018 R_k \, cos\beta \le 1 \qquad (2.17)$$

Из зависимости (2.12) модуль звукового давления принимает вид:

$$|P_1| = \frac{3.5 \times 10^{-2} (f_k R_k)^2 \upsilon_k l_k}{R} \qquad (2.18)$$

где l_k – собственные частоты колебаний валка, Гц.

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

$$|P_2| = \frac{22\,(f_k R_k)^{0.5} \upsilon_k l_k}{R} \qquad (2.19)$$

Отсюда, с учётом формулы (2.11), получаем:

$$L_{P1} = 20\lg\frac{3\times10^{-2}(f_k R_k)^2 \upsilon_k l_k}{2\times10^{-5}} = 40\lg f_k R_k + 20\lg\frac{l_k \upsilon_k}{R} + 64 \qquad (2.20)$$

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

(2.21)

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

$$f_k = 4 \times 10^3 R_k \left(\frac{k}{l}\right)^2 \qquad (2.22)$$

Для длинных заготовок звуковая энергия излучается несколькими роликами, количество которых задается как $\mathrm{k_B} = \frac{\mathrm{l_3}}{\mathrm{h_в}}$,

где $\mathrm{l_3}$ – длина заготовки, м;

$\mathrm{h_в}$ – шаг расположения роликов, м.

Уровень звукового давления для всей конструкции тогда выглядит следующим образом:

$$L_{P\Sigma} = L_P + 10\lg\frac{l_з}{h_в} \qquad (2.23)$$

В работе [219] звуковое давление, создаваемое рольганговым механизмом (рисунок 2.10), определяется с учётом рамы как системы стержневых элементов, а также подшипниковых узлов и цепной передачи. По методологии [218, 219] получены следующие расчётные зависимости:

$$P = 2{,}3 * 10^3 \frac{khRv_k}{r};$$

$$L_p = 20lg\frac{khRv_k}{r} + 147, \qquad (2.24)$$

где h – толщина звездочки, м;

R – радиус делительной окружности, м;

k – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний;

v_k – скорость колебаний на собственных частотах, м/с;

r – расстояние от центра звездочки до расчетной точки, м.

Отсюда, по данным [219, 221], звуковое давление и его уровень рассчитывают так:

$$P = 15av_k\sqrt{\frac{f_k}{r}};\ L_p = 20lgav_k + 10lg\frac{f_k}{r} + 118, \qquad (2.25)$$

где а – размер поперечного сечения, м.

Для элементов из металлического проката зависимость (2.25) приобретает вид:

$$L_p = 20lgav_k\frac{k}{l} + 5lg\frac{J}{F} - 10lgr + 157; \qquad (2.26)$$

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

Существующие методы расчёта звукового давления рольганговых механизмов не учитывают потерь колебательной энергии в роликах с вибродемпфирующими материалами (рисунок 2.11).

Чем выше внутренние потери колебательной энергии (например, за счёт вязкоупругих материалов с высоким коэффициентом механических потерь), тем слабее вибрация и меньше излучаемая звуковая мощность [222]. Внутреннее рассеяние энергии складывается из диссипации в самом материале упругого элемента, испытывающего циклические нагрузки, и структурного рассеяния в сопряжениях и соединениях механической системы.

В общем случае 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:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \qquad (2.27)$$

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,

$$W = C\frac{a^2(t)}{2} \qquad (2.28)$$

где С – жесткость системы.

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:

$$\psi = -\frac{dW}{W} = -\frac{d(a^2)}{a^2} = -\frac{2\,da}{a} \qquad (2.29)$$

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

$$\psi \approx 2 \cdot \delta = 2\ln\left(\frac{a_k}{a_{k+1}}\right) \qquad (2.30)$$

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 (2.31).

Коэффициент потерь связан с логарифмическим декрементом:

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi}\ln\frac{a_k}{a_{k+1}} \qquad (2.32)$$

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 [222]:

$$\Delta L = 10\lg\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right) = 20\lg\left(\frac{v_1}{v_2}\right), \text{ дБ} \qquad (2.33)$$

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.

Снижение уровня шума при демпфировании элементов металлоконструкции прямо пропорционально логарифму отношения коэффициентов потерь энергии до и после модернизации.

С учетом исследования [275], снижение уровня звукового давления ΔL при нанесении одностороннего вибропоглощающего слоя на металлическую конструкцию описывается выражением:

$$\Delta L = 10 \lg\left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_1}\right), \text{дБ} \qquad (2.34)$$

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

$$\eta_{\text{экв}} = \eta_1 + \beta \cdot \eta_2 \qquad (2.35)$$

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

$$\beta = 3 \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{h_2}{h_1}\left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)^2 \qquad (2.36)$$

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 $h_2/h_1 \approx 1{,}5 \ldots 3{,}0$). При дальнейшем увеличении h_2 эквивалентный коэффициент потерь изменяется незначительно, но существенно возрастают масса и габариты узла.

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 [294].

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

Выводы к второй главе

1. Анализ условий труда на промышленных предприятиях показывает, что состояние охраны труда и техники безопасности требует серьёзной модернизации. Среди опасных и вредных производственных факторов одно из ведущих мест занимают повышенные уровни шума и вибрации от технологического оборудования, которые вызывают профессиональные заболевания и производственный травматизм.

2. Неблагоприятные условия труда складываются из нескольких причин: несоответствия микроклимата и аэрозольного состава воздуха рабочей зоны санитарно-гигиеническим нормам (ПДК), высоких физических нагрузок, недостатков в организации рабочих мест, нарушений правил техники безопасности.

3. Более трети рабочих мест с вредными и опасными условиями труда отличаются систематическим превышением допустимых уровней виброакустического воздействия. Приведение виброакустических параметров на рабочих местах к нормативам необходимо для снижения рисков профессиональной патологии и роста производительности труда.

4. Виброакустические факторы на рабочих местах предприятий машиностроения, горнорудной и металлургической промышленности в значительной мере формируются ударно-вибрационными процессами, сопровождающими работу технологического оборудования на разных стадиях обработки материала.

5. На ОАО «ТАЛКО» опасные и вредные производственные факторы в той или иной мере сопутствуют всем стадиям основного и вспомогательного производства алюминия; они различаются по природе, интенсивности, продолжительности воздействия и тяжести.

6. Опасные и вредные факторы возникают при выходе жидкого металла и шлака в зоны обслуживания, взрывах и выбросах вредных веществ. Это приводит к значительному экономическому ущербу, травмам обслуживающего персонала и загрязнению окружающей среды.

7. Условия труда персонала определяются комплексом факторов: виброакустическими параметрами (общая вибрация и шум), микроклиматом, освещённостью, электромагнитными полями, аэрозольным и газовым составом воздуха рабочей зоны, тяжестью и напряжённостью трудового процесса.

8. Моделирование виброакустических процессов ударно-вибрационного происхождения при транспортировке заготовок на рольгангах подтверждает, что повышенные шум и вибрацию вызывают главным образом удары транспортируемого материала о ролики и соударения деталей между собой.

9. Для снижения виброакустического излучения разработана модернизированная конструкция ролика рольганга, состоящая из стальной бочки с промежуточным демпфирующим слоем из многокомпонентного алюминиевого сплава.

10. Разработан методологический подход к теоретическому описанию виброакустического возбуждения в роликовых транспортёрах, позволяющий рассчитывать уровни звукового давления с учётом диссипации колебательной энергии в промежуточном демпфирующем слое ролика.

11. Полученные математические зависимости позволяют вычислить эквивалентный коэффициент потерь энергии и оценить ожидаемое снижение уровней звукового давления в конструкции ролика с вибропоглощающим слоем при ударно-вибрационных нагрузках.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОУДАРЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВИБРОАКУСТОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

3.1. Выбор материалов для изучения виброакустических и демпфирующих 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 [221, 222, 223]. 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» [224–226].

Эти материалы выбраны для оценки вибродемпфирующих свойств с целью защиты персонала от виброакустических факторов. Эти факторы порождаются главным образом ударно-вибрационными процессами при соударении деталей и узлов машин в ходе следующих технологических операций:

– механическая обработка материалов;

– дробление, измельчение, грохочение и классификация сырья;

– формование и вибрационное уплотнение материалов;

– транспортировка сырья и заготовок;

– перемешивание и интенсификация химико-технологических процессов;

– бурение, рыхление и разрушение горных пород и грунтов;

– прокатка, продувка, протяжка и др.

Перечисленные операции распространены в большинстве отраслей промышленности, и почти во всех случаях шум и вибрация при них превышают предельно допустимые уровни (ПДУ). Выбор демпфирующих материалов объясняется физической природой процесса. Виброакустические факторы возникают как механические колебания узлов и элементов оборудования (структурный шум и вибрация) и лишь затем преобразуются в воздушный шум, распространяющийся по рабочей зоне.

Согласно ГОСТ 1639–93, «…алюминиевые сплавы делятся на литейные (на основе силуминов) и деформируемые (на основе сплавов с медью, магнием и другими элементами). Сплавы системы Al–Si, известные как силумины, принадлежат к числу наиболее распространенных литейных сплавов на алюминиевой основе и находят широкое применение в качестве конструкционных материалов. Силумины отличаются хорошей технологичностью, достаточно высоким уровнем физико-механических свойств и коррозионной стойкостью, благодаря чему успешно конкурируют с черными металлами, полностью заменяя их или вытесняя из традиционных областей применения в машиностроении, авиастроении, судостроении и ряде других отраслей промышленности. Указанное сочетание свойств делает силумины перспективными для использования в качестве конструкционных виброакустодемпфирующих материалов, предназначенных для снижения виброакустических факторов механизмов и машин в различных сферах промышленности» [89, 247]. Характеристики ряда литейных алюминиевых сплавов приведены в таблице 3.1.

Деформируемые сплавы Al–Zn–Mg с добавками меди Cu, циркония Zr, титана Ti, марганца Mn, кремния Si, хрома Cr, железа Fe и никеля Ni, в отличие от силуминов, можно прокатывать и прессовать. Уже поэтому механика и акустика у них другие.

Таблица 3.1. – Химический состав и механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Модификатор (добавка)	Содержание элементов, масс. %			Предел прочности σВ, МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость НВ
	Si	Mg	Добавка			
Сурьма (Sb)	6	0,1	0,005 Sb	218	7,0	79
	9	0,3	0,1 Sb	216	5,6	77
Барий (Ba)	6	0,1	0,005 Ba	196	7,4	74
	9	0,3	0,1 Ba	202	8,0	75
Стронций (Sr)	6	0,1	0,005 Sr	206	13,0	56
	9	0,3	0,1 Sr	212	12,0	58
Без добавок (базовый)	9	0,25	–	160	3,2	56
	12	0,25	–	170	2,4	48

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.

Чтобы повысить способность алюминиевых сплавов поглощать и рассеивать вибрационную энергию, их легировали различными металлами. Модифицирующие компоненты выбирали из нескольких групп: щелочноземельные элементы (Ca — кальций, Sr — стронций, Mg — магний, Ba — барий), переходные металлы (Ni — никель, Ti — титан, Nb — ниобий, Cr — хром, Hf — гафний, Sb — сурьма, V — ванадий, Cu — медь и другие) и редкоземельные элементы (Nd — неодим, Sc — скандий, Gd — гадолиний, Y — иттрий, Ce — церий, Yb — иттербий и другие). Добавки вводили для того, чтобы изменить структуру сплава, усилить демпфирование колебаний и улучшить виброакустические характеристики.

Работая с силуминами, мы прежде всего смотрели, что модифицирование щелочноземельными и редкоземельными металлами делает со структурой,

фазовым составом и рабочими свойствами сплава. Сравнение разных модификаторов опубликовано в [227–235].

Состав и основные свойства деформируемых сплавов – 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	σв, 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

Сплавы выплавляли в вакуумной печи сопротивления в атмосфере очищенного гелия в корундовых и графитовых тиглях из металлов чистотой 99,9–99,9999 %, легирующие элементы вводили через алюминиевые лигатуры с 0,05–1,0 % (по массе) модификатора. 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».

Многослойные композиты (низкоуглеродистая сталь, плакированная деформируемым алюминиевым сплавом) получали прокаткой на двухвалковом стане 300 (рисунок 3.1, 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

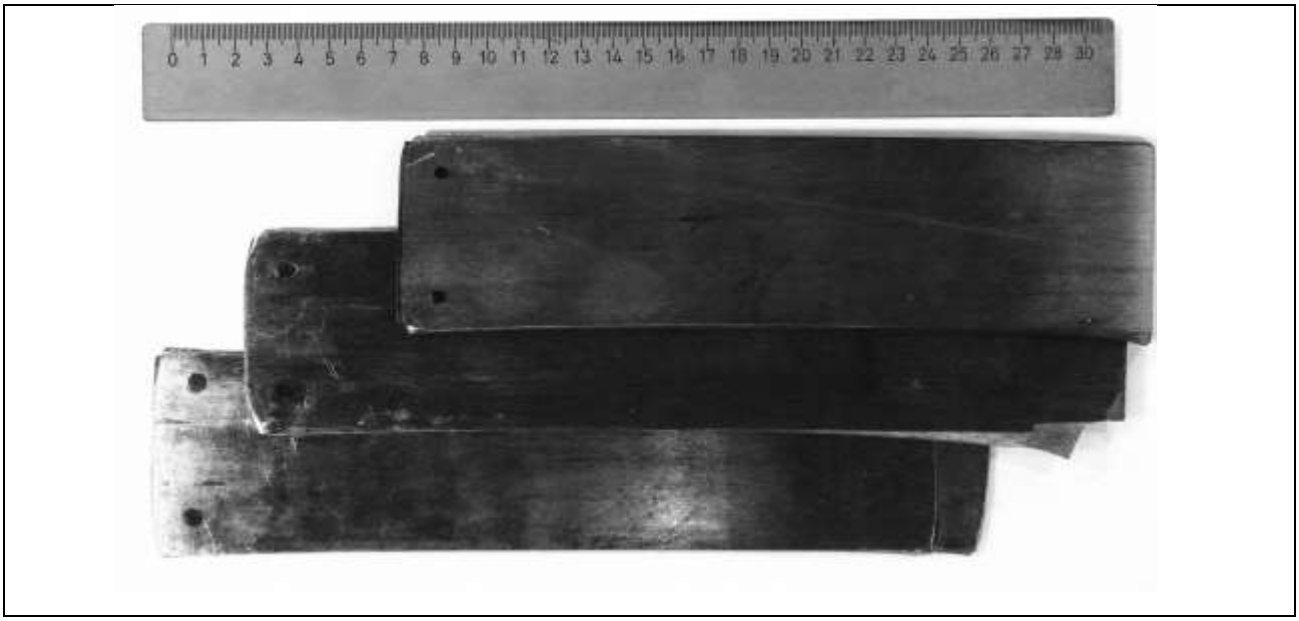


Рисунок 3.1. – Образцы из многослойных композиционных материалов

Растяжение проводили при комнатной (+20 ˚С) и повышенных, до 350 ˚С, температурах. Определяли основные показатели прочности и пластичности:

- временное сопротивление разрыву (предел прочности) σв, МПа;

- относительное удлинение после разрыва δ %.

Эти испытания показали, как состав, структура и температура влияют на прочность и пластичность сплавов и композитов.

3.2. Теоретические основы и механизмы звукоизлучения металлов и сплавов при механическом воздействии

Помимо демпфирования, акустические свойства металла включают поглощение и рассеяние звука и собственное звукоизлучение при механическом воздействии. Наиболее важны для промышленного шума изгибные колебания, поскольку при изгибе металлоконструкции излучают и теряют больше всего энергии. Связь колебаний системы с излучаемым звуком сложна, поэтому в теории и эксперименте используют тела простой формы – стержни, пластины, диски, оболочки, на которых проще выделить вклад материала.

«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» [206, 236–243].

Японские исследователи Т. Игараси и Т. Кавамото оценивали акустические характеристики стальных и бронзовых колоколов [227]. Они установили, что при возбуждении колебаний как механическим ударом, так и электродинамическим преобразователем в свободном звуковом поле логарифмический декремент затухания излучаемых звуковых волн прямо определяется физико-механическими и демпфирующими свойствами материала конструкции [227].

Другие авторы изучали удар шара по пластине: как связаны ударный импульс, вибрация и звук. Пластины были из стали, дерева и стекла, ударники – разной массы, формы и материала (сталь, резина). Оказалось, что спектр и громкость шума задаются прежде всего свойствами соударяющихся тел.

Цель была понять, от чего зависят уровень и спектр шума при ударе. Удар хорош тем, что опыт похож на реальное образование шума. Плох тем, что у каждого автора свои образцы – другой формы, размера, крепления, – и сравнивать результаты трудно [89, 189, 245–247].

G.R. Schad и H. Warlimont отмечают: «…исследование процессов формирования шума и структурного демпфирования может проводиться методом ударного возбуждения колебаний. Авторами была предложена экспериментальная модель в виде четырехгранного бункера, изготовленного из стальных листов толщиной 6 мм, соединенных сваркой. Воздействие на конструкцию создавалось посредством удара стальным шаром массой 5 кг, сбрасываемым с высоты 30 см» [231].

Модель испытали в четырёх вариантах: голой; со слоем AST толщиной 6 мм, жёстко соединённым с основанием; со слоем, просто уложенным сверху; со слоем на заклёпках.

Лучше всего сработал слой, жёстко связанный с основанием: уровень звука упал на ≈дБА по сравнению с исходной конструкцией, хотя теоретическая модель обещала ≈дБА. Модель учитывала в основном жёсткость и поверхностную массу пластины, а потери на трение между слоями – не полностью.

Но в опыте шум снизился ещё примерно на 10 дБА сильнее, чем предсказывал расчёт. Значит, кроме структурного демпфирования, работают и другие механизмы поглощения в материале, а какие – авторы не выясняли. Не указан и масштаб модели ковша, так что трудно сказать, насколько её можно сравнивать с настоящим ковшом.

Со временем звукоизлучение металлов стали изучать систематически: появились специальные установки и методики измерения акустических параметров материалов [56–58].

Образцы-пластины стандартных размеров вешали вертикально на вольфрамовых нитях диаметром ≈ 20 мкм: такой подвес почти не отбирает энергию и не искажает спектр собственных колебаний.

Свободные колебания пластин возбуждались центральным ударом стального шарика диаметром ≈ 10 мм и массой $\approx 4{,}5$ г.

Измерительный комплекс был не слишком точным, и это добавляло приборную погрешность.

Зато удар как способ возбуждения позволяет видеть, как механическая энергия в действительности превращается в звук.

Интересны работы [56, 247] о том, откуда берётся ударный шум. Авторы одновременно записывали звук и изменение во времени силы контакта при ударе стального шарика о пластину [56, 247].

Хорошая аппаратура и расчёт по теории Герца и Зенера не снимают всех вопросов к методике. Непонятно, почему выбраны именно такие размеры пластины по отношению к ударнику (стальному, нейлоновому, резиновому). Не объяснено и расстояние до микрофона – 750 мм. С теорией излучения эти величины согласуются плохо, и на достоверности это может сказаться.

Ударное возбуждение даёт сразу две группы данных: о звуке (уровень, спектр, длительность импульса) и о потерях энергии внутри материала. После одиночного удара и колебания, и звук затухают – из-за внутренних и внешних потерь [189].

Чем больше внутреннее трение материала, тем быстрее в нём затухает звук. В работе [237] 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.

Есть и другая зависимость, связывающая внутреннее трение в металле с характеристиками его звуковых колебаний [248]:

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

где dn – скорость затухания звуковых колебаний пластины, дБ/с;

E – модуль нормальной упругости;

μ – коэффициент Пуанссона;

h – толщина пластины, м; a,

b – линейные размеры пластины, м;

m,n –1,2,3 – целочисленные значения, определяющие количество полуволн, которые помещаются в пластину;

Д =Eh3/12(1–μ) – цилиндрическая жесткость пластины при изгибе.

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 виброакустических и демпфирующих свойств конструкционных материалов

Чтобы машины проектировали с расчётом на тишину, нужны конструкционные материалы, лучше гасящие колебания [249]. Такой материал должен ещё и быть прочным, технологичным и долговечным, а значит, и измерять его демпфирование нужно точно.

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 общем случае 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:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}; \tag{3.3}$$

Данные о демпфировании одинаковых или почти одинаковых по составу и термообработке материалов у разных авторов сильно расходятся [250]. Неудивительно: потери в твёрдом теле зависят от напряжения, частоты, температуры и структуры. Чтобы понять, какой механизм главный, метод измерения приходится выбирать с умом.

Методы измерения потерь при циклической деформации делятся на прямые и косвенные [251, 252]. Прямые меряют площадь петли гистерезиса «напряжение – деформация» ($\sigma - \varepsilon$) или тепло, выделившееся в образце. Косвенные судят о потерях по сопутствующим явлениям: логарифмическому декременту свободных колебаний δ, ширине резонансной кривой $\Delta f / f_r$ при вынужденных колебаниях, затуханию акустических волн.

Прямые методы: энергетический, калориметрический и метод петли гистерезиса.

Косвенные: свободно затухающих колебаний, резонансной кривой, фазовый и некоторые другие.

Выбор метода зависит от целей исследования; у каждого есть свои преимущества и недостатки.

Наиболее распространён метод свободно затухающих колебаний, который основан на обработке осциллограмм свободно затухающих колебаний образца. Демпфирующую способность характеризуют логарифмическим декрементом колебаний δd или относительным рассеянием энергии φ, вычисляемыми по скорости уменьшения амплитуды. Логарифмический декремент 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;

An – 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.

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

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

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

При большом затухании использование равенств (3.5) и (3.7) может нарушить соотношение (3.6) [250]. В таких случаях прибегают к дифференциальному измерению относительного рассеяния энергии и декремента колебаний.

На основании равенства (3.5) при An $\rightarrow$Ao и t$\rightarrow$ N получается уравнение для декремента колебаний, соответствующего амплитуде A1.

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

Из выражений (3.8) следует простое равенство для определения декремента вдоль огибающей затухающих колебаний [53]

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

где $\overline{N}$ – число циклов (как составных, так и дробных) в поперечном сечении под касательной, проведенной к огибающей в зоне видимости амплитуды А.

Уравнение (3.9) позволяет определять декремент колебаний как при больших, так и при малых затуханиях.

Многочисленные экспериментальные установки для измерения демпфирующей способности классифицируют следующим образом:

«– по виду механических колебаний в образце (крутильные, поперечные или изгибные, продольные):

– по диапазону амплитуд колебаний или виду зависимости демпфирующей способности от амплитуды (область амплитуднонезависимого демпфирования, область амплитуднозависимого демпфирования);

– по характеру колебаний (свободные, вынужденные);

– по частоте колебаний (квазистатистические, низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные);

– по способу возбуждения колебаний (механические, электрические);

– по способу регистрации колебаний (визуальный, механический, фотографический, электрический и т.д.)» [218].

Каждая из этих установок имеет свои достоинства и недостатки. Главным недостатком, по мнению авторов, «является несоответствие ГОСТам существующей измерительной техники и методам обработки результатов

измерений демпфирующей способности металлов, за крайне редким исключением. Все это усложняет получение сопоставимых и достоверных результатов измерения» [256].

Способов измерить демпфирование, таким образом, хватает. Чаще всего пользуются свободно затухающими колебаниями и логарифмическим декрементом. Но результат сильно зависит от частоты, амплитуды, температуры и структуры, а единых методик нет – вот почему данные разных лабораторий так трудно сопоставить и почему методы ещё надо совершенствовать.

3.4. Моделирование процесса звукоизлучения при столкновениях деталей машин и разработка методологии изучения вибрационно-акустических демпфирующих свойств металлов и сплавов

В реальном цехе на шум влияет столько всего, что заглушить его трудно. Поэтому виброакустическую защиту обычно отрабатывают на физических моделях.

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 [257]:

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

$$Дн/Дм=id\in m \qquad (3.\ 10)$$

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 и натуры 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:

$$Z_м=Z_н \text{ при } f_м=(L_м.C_м/ L_н.\ C_н)\ f_н \qquad (3.13)$$

При разработке технических решений по снижению 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 [253]. Окружающая среда (воздушный бассейн) модели и натурного объекта должны иметь одинаковые показатели плотности и температуры ($\boldsymbol{\rho_м = \rho_н}$, $\boldsymbol{T_м = T_н}$);

– зазоры, посадки, микрогеометрия и шероховатость трущихся поверхностей, а также смазка должны быть масштабированы и сопоставимы.

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 $\boldsymbol{r_н/r_м = K_L}$.

Rм/ Rн = Дм / Дн (3.14)

Границы подобных частотных полос модели и натуры связаны так:

fн1/fм1=fн2/fм2=Дм/Дн (3.15)

Модельный эксперимент кропотлив. Однако если масштаб выбран удачно и подобие соблюдено строго, модель звучит так же, как натура, и результаты можно переносить на реальные машины.

«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» [254]. При исследовании кинематики и динамики тел сложной пространственной конфигурации в инженерных расчетах широко применяется метод конечных элементов (МКЭ).

Стержни и пластины обычно рассчитывают, пренебрегая одним или несколькими размерами по сравнению с длиной волны и считая, что колебания и излучение определяются изгибными волнами. Продольные и сдвиговые волны добавляют, только когда без них не обойтись. Природу волн в пластинах подробно разобрал И.И. Артоболевский с соавторами [234]. Из-за двух свободных

поверхностей в пластине бегут особые волны – волны Лэмба: вдоль пластины они распространяются, а по толщине стоят. Стоячая картина по толщине складывается из многократных отражений от граней. Возбудить эти волны непросто, потому что продольные и поперечные волны при отражении переходят друг в друга.

Фазовая скорость нормальных волн зависит от частоты звуковых колебаний и толщины пластины h (от их произведения $f \cdot h$), что проиллюстрировано на рисунке 3.1.

$$c_p = \frac{c_2}{Sin\alpha} = \frac{c_2}{\sqrt{1-(\frac{0.5n\lambda_2}{h})^2}}; \qquad (3.16)$$

Если пластину утолщать, мода (форма волны, которая зависит от геометрии, материала и частоты) всё больше похожа на поверхностную волну. Такие волны возможны при разных частотах и толщинах. Нулевая симметричная мода – это растяжение-сжатие по всей толщине, нулевая антисимметричная – изгиб.

С расстоянием упругие и звуковые волны слабеют по экспоненте – энергия поглощается и рассеивается. Насколько быстро, зависит и от волны, и от среды; в расчёт это входит мнимой частью волнового числа $k = 2\pi/(1 + j\delta)$, где δ – коэффициент затухания. Он складывается из коэффициента поглощения δ_n (внутреннее трение, теплопроводность) и коэффициента рассеяния δ_r (неоднородность структуры, анизотропия, границы зёрен):

$$\delta=\delta n+\delta p \qquad (3.17)$$

Реальные металлы поликристалличны, и упругие волны в них, как отмечено в [234], затухают из-за рефракции и рассеяния на анизотропных кристаллитах. Рефракция искривляет фронт и уменьшает амплитуду. На границах зёрен волна частично отражается, преломляется и меняет тип – это главный механизм рассеяния. В крупнозернистой меди и аустенитных сталях работают оба механизма,

в мелкозернистых алюминиевых сплавах и низкоуглеродистых сталях – в основном рассеяние.

С.А. Головин с соавторами показали, что металлические детали звучат прежде всего при ударе, а удар – одна из главных причин механического шума машин [235]. Ударные шумы классифицируют по модели возбуждения: удар шаров друг о друга, о стойку, пластину или оболочку. При ударе в материале бегут нестационарные волны напряжений.

Динамические напряжения при импульсном контакте анализируют, описывая распространение плоской упругопластической волны вдоль полубесконечного или длинного стержня уравнением движения в частных производных (уравнением волнового переноса деформаций Кармана – Тейлора – Рахматулина):

$$\frac{\partial \sigma_{11}^{o}}{\partial x_1^{o}} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}; \qquad (3.18)$$

где, ρ – плотность металла.

При высокоскоростной деформации металлов приходится учитывать инерционные эффекты. В неограниченной упругой среде волны напряжений распространяются с двумя скоростями: продольной и поперечной волн.

$$c_1 = [\frac{(B + \frac{4G}{3})}{\rho}]^{1/2}; \qquad (3.19)$$

и скорости поперечной волны

$$c_2 = (\frac{G}{\rho})^{1/2}; \qquad (3.20)$$

Скорость фронта пластической волны, вызывающей деформацию ε, равна:

$$c = \sqrt{\frac{(\frac{d\sigma^o}{d\varepsilon^o})}{\rho}}; \qquad (3.21)$$

При упругом ударе максимальное напряжение составляет

$$\sigma = \frac{EV}{c}; \qquad (3.22)$$

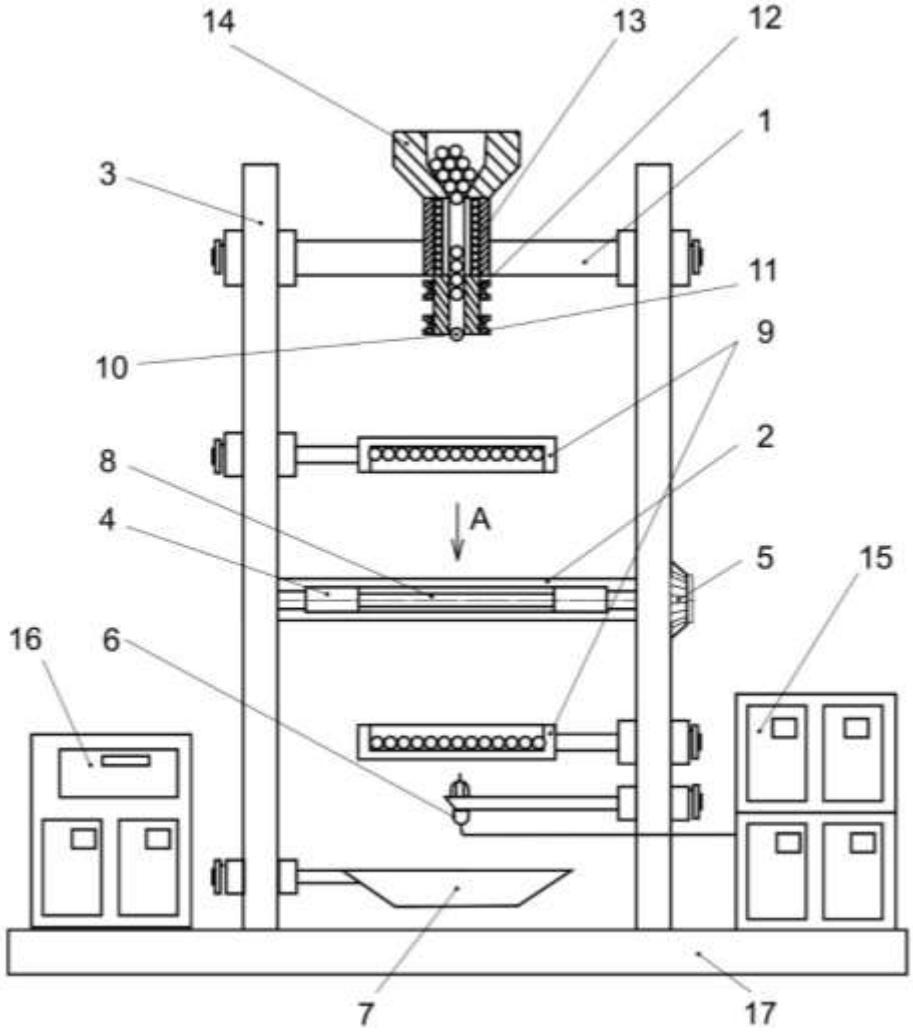
где, V – скорость соударения, м/с;

E – модуль упругости материала, МПа.

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. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 3.2 [241].

Чтобы исключить повторные удары, плоскость подвеса образца наклоняют к горизонтали под разными углами устройством 5. Ударник в виде стального шарика 10 (сталь ШХ15, диаметр 10 мм, масса 4,5 г) поступает из бункера 14 в трубчатую печь 13, нагревается и притягивается сердечником верхнего электромагнита 11. При отключении питания шарик свободно падает на подвешенный плоский образец 8 и возбуждает в нём изгибные колебания, при этом потенциальная энергия переходит в кинетическую. Отскочившие шарики собираются в приёмнике (уловителе) 7.

Чтобы изучить влияние температуры, образец 8 нагревают элементами 9 до нужной температуры.



Приложение: 1 – подвижная пластина; 2 – неподвижная пластина; 3 – несущие стойки; 4 – регулируемая пластина; 5 – шлицевое соединение системы позиционирования; 6 – измерительный микрофон (первичный акустический преобразователь); 7 – уловитель шариков (приемник импульсных ударников); 8 – испытуемый образец (пластина); 9, 13 – трубчатый нагревательный элемент (система высокотемпературного нагрева); 10 – стальной шарик (ударный элемент); 11 – электромагнитный узел сброса; 12 – вольфрамовая нить свободного подвеса; 14 – бункер подающего устройства; 15 – панель акустического измерительно-вычислительного прибора; 16 – измеритель-регулятор температуры; 17 – массивная виброизолированная опорная плита.

Рисунок 3.2. – Схема экспериментальной установки для оценки акустических и демпфирующих свойств материалов при импульсном возбуждении (установка ТТУ–2)

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 (рис. 3.3) [241].

Опыт на ТТУ–2 (рис. 3.3) идёт так. Пластину 8 размером $50 \times 50 \times 5$ мм кладут на опорную платформу между натянутыми вольфрамовыми нитями подвеса.

Механизмом юстировки 4 плоскость подвеса наклоняют к горизонтали, чтобы шарик не ударил дважды. Стальной шарик 10 (ШХ15, диаметр 10 мм, масса 4,5 г) висит на электромагните 11 на заданной высоте. Магнит отключают – шарик падает и бьёт точно в центр образца 8; энергия удара переходит в колебания пластины, и она звучит. Отскочивший шарик ловит приёмник 7.

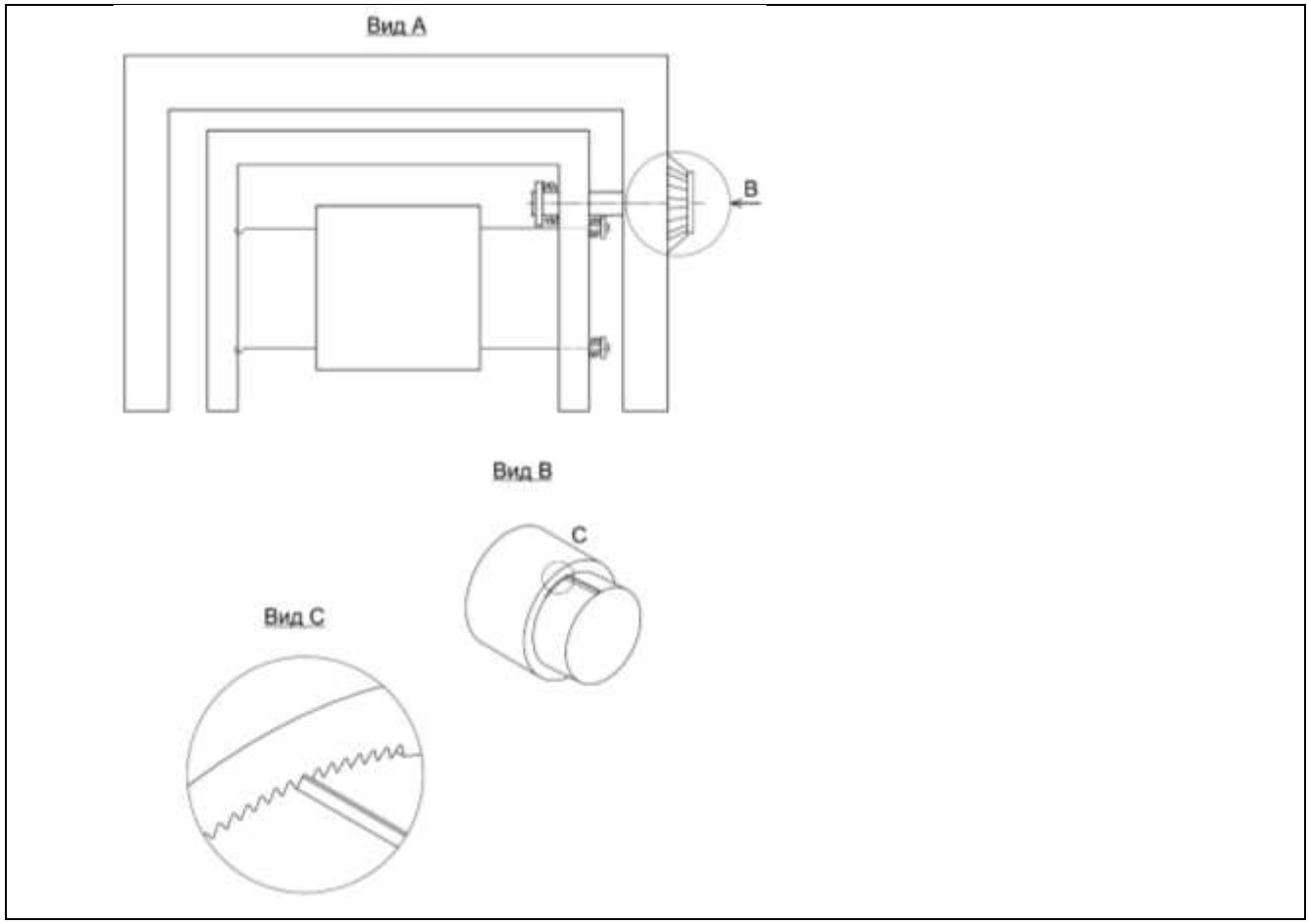


Рисунок 3.3. – Механизм регулирование наклона образца при установке ТТУ–2

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 [269]:

$$m < 4.6\rho\, l\, h \qquad (3.23)$$

где ρ – плотность материала пластины, кг/м3;

l – расстояние от точки приложения удара до ближайшего края пластины, м;

h– толщина пластины, м.

Размеры образцов выбирали по теории тонких пластин: толщина $\boldsymbol{h}$ не больше пятой части длины и ширины ($\boldsymbol{h \leq \frac{1}{5} a}$). У всех образцов это условие соблюдено.

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 [267]:

$$r_2 \cong 5{,}5\ r_1 \qquad (3.24)$$

Сигналы в аналоговом и цифровом виде поступали в измерительный комплекс, который вместе с микроконтроллером и вычислительным модулем делает стенд полностью автоматическим. Спектр для наглядности выводился на осциллограф ступенчатой гистограммой.

Кроме октавного, в акустике материалов применяют третьоктавный и узкополосный анализ. При ударном возбуждении именно третьоктавный анализ лучше всего показал, какие частоты определяют эквивалентный и пиковый уровни.

На рисунке 3.4 – третьоктавный спектр звука пластины из стали 08пс. Чётко видны резонансные пики на частотах $\boldsymbol{\approx 2{,}0}$; $\boldsymbol{\approx 2{,}5}$; $\boldsymbol{\approx 6{,}3}$; $\boldsymbol{\approx 10{,}0}$; $\boldsymbol{\approx 12{,}5}$ и $\boldsymbol{\approx 16{,}0}$ **кГц**.

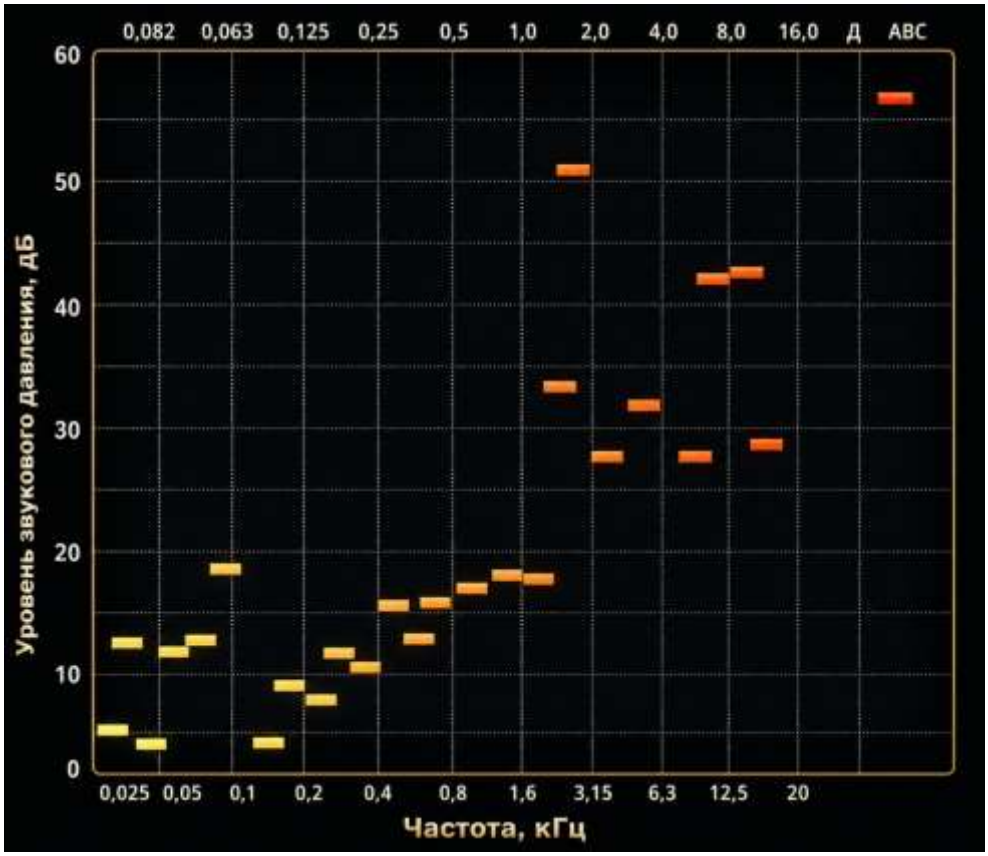
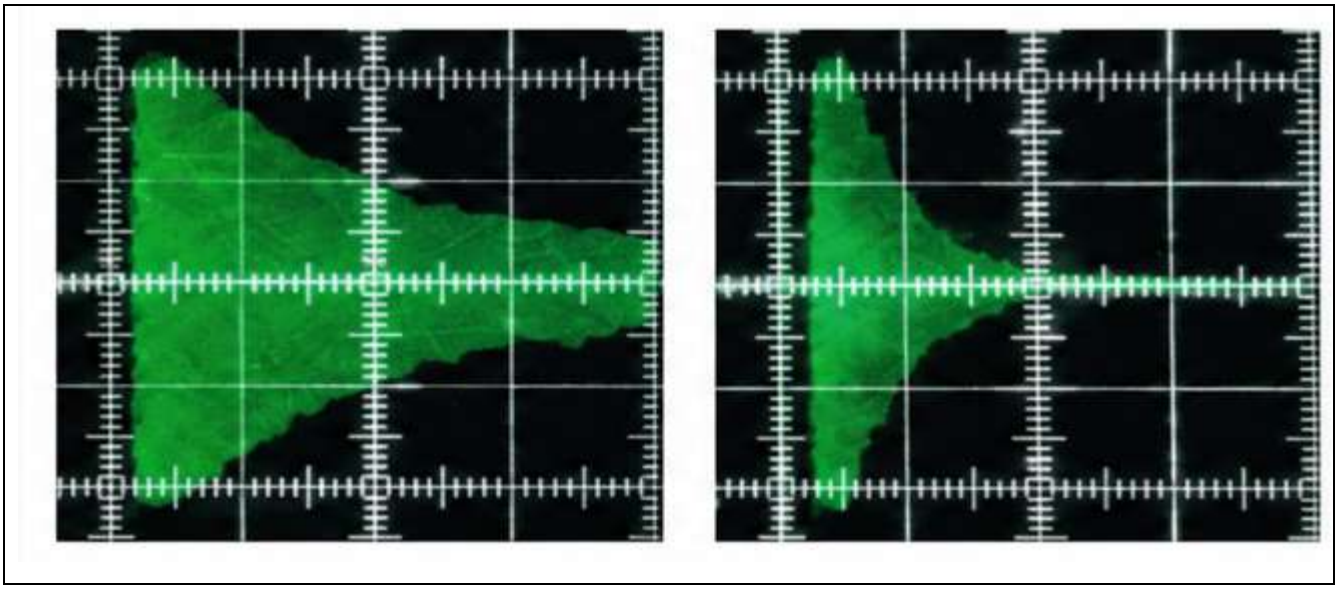


Рисунок 3.4. – Третьоктавный спектр звукоизлучения для стали марки 08пс.

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.



а) б)

Рисунок 3.5. – Осциллограммы затухающих колебаний

а) сталь 45; б) виброакустодемпфирующий материал.

Скорость затухания звука в пластине связана с её свойствами и параметрами излучения так:

$$d_3 = (\frac{40}{\tau_3}) \lg[((\pi \cdot \tau_c)\sqrt{\frac{D}{\rho\delta}}) / a^2] \quad ; \qquad (3.25)$$

отсюда, dз – скорость затухания звука, дБ/мс;

τз – продолжительность звучания, вызванная импульсным ударом, с;

τс – продолжительность соударения, с;

а – стороны квадрата поверхности пластины, м;

ρ – плотность материала пластины, кг/м3;

δ – толщина пластины, м;

Д=(Eδ3)/12(1–μ2) – цилиндрическая жесткость пластины;

где Е – модуль упругости материала пластины, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

Измерения на алюминиевых сплавах – спектров и общего уровня звука, скорости затухания и внутреннего трения, механических свойств – хорошо воспроизводились и согласовывались между собой [270].

В таблице 3.4 – акустика стального образца при разных углах наклона подвеса и разной температуре шарика.

Таблица 3.4. – Результаты измерения акустических свойств образца

Угол наклона образца в градусах	2	4	6	8	10
Уровни звука, дБА	102	97	93	89	86
Температура нагрева шара, оС	100	150	200	250	300
Уровни звука, дБА	82	77	74	72	70

Полученные данные подтверждают высокую точность фиксации образца и воспроизводимость результатов, отражающих связь между физико-механическими свойствами материала и характеристиками звукоизлучения. По итогам исследований сформулированы следующие выводы:

Математические и физические зависимости. 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.

Конструктивное совершенствование стенда. Узел ступенчатой регулировки угла наклона плоскости подвеса (шаг 2°) и свободное позиционирование образца без внешних закрепляющих усилий повышают точность фиксации, исключают повторные соударения и обеспечивают высокую воспроизводимость данных.

3.5. 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:

– ГОСТ 12.1.050–86 – регламентирует методы измерения шума на рабочих местах в производственных помещениях и на территориях предприятий;

– ГОСТ 12.1.003–2014 – устанавливает классификацию, нормируемые параметры и допустимые уровни шума на рабочих местах, а также порядок измерения шума для оценки его воздействия на работника и расчета эквивалентного уровня звука за рабочую смену [274];

– ГОСТ 12.1.012–2004 – общие требования вибрационной безопасности на производстве, транспорте, в строительстве, горных и других работах, где человек подвергается вибрации [275];

– СанПиН 1.2.3685–21 – гигиенические нормативы, с которыми сравнивают результаты замеров: эквивалентные и максимальные уровни звукового давления и звука, эквивалентные уровни виброускорения на рабочих местах.

Мерить нужно при обычной работе – так, как оборудование работает на самом деле.

Методика измерения производственного шума. Главная измеряемая величина – уровень звукового давления в децибелах, то есть логарифм отношения действующего давления к пороговому [271, 272]:

$$\boldsymbol{L_p = 20\lg\left(\frac{p}{p_0}\right)}, \qquad (3.26)$$

где L_p −уровень звукового давления, дБ;

p – среднеквадратическое значение звукового давления, Па;

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – пороговое звуковое давление.

Для общей оценки шума берут уровень звука, скорректированный по характеристике $\boldsymbol{A}$ прибора. Шкала $\boldsymbol{A}$ учитывает, что ухо по-разному слышит разные частоты; результат выражают в дБА.

Если нужно не просто оценить шум, а придумать, как его снизить (рассчитать звукоизоляцию, глушитель, демпфер), уровни снимают по октавным или третьоктавным полосам. Тогда видно, какие составляющие спектра главные и где резонансы.

Для непостоянного шума основным расчётным показателем является эквивалентный уровень звука:

$$\boldsymbol{L_{Aeq,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\int_0^T 10^{0{,}1L_A(t)}\,dt\right)}, \qquad (3.27)$$

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:

$$\boldsymbol{L_{Aeq,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\sum_{i=}^{n} t_i \cdot 10^{0{,}1L_{Ai}}\right)}, \qquad (3.28)$$

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:

$$\boldsymbol{L_{EX,8ч} = L_{Aeq,T} + 10\lg\left(\frac{T}{T_0}\right)}, \qquad (3.29)$$

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.

На промышленных предприятиях работник часто находится под воздействием нескольких источников шума. Суммарный уровень от независимых источников определяется по формуле:

$$\boldsymbol{L_{\Sigma} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1L_i}\right)}, \qquad (3.30)$$

гдеL_{Σ} –суммарный уровень звука, дБ;

L_i – уровень звука от i–го источника, дБ;

n – количество источников шума.

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:

$$\boldsymbol{L_a = 20\lg\left(\frac{a}{a_0}\right)}, \qquad (3.31)$$

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 корректированное среднеквадратическое виброускорение определяется в каждой оси по формуле:

$$\boldsymbol{a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2\,(t)dt}}, \qquad (3.32)$$

где a_w – корректированное среднеквадратическое виброускорение, м/с²;

$a_w(t)$ –– мгновенное значение виброускорения с учетом изменения частоты;

T – продолжительность измерения.

При дискретной обработке результатов используется выражение:

$$\boldsymbol{a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} a_{wi}^2\, t_i}}, \qquad (3.33)$$

где a_{wi} – корректированное виброускорение на i–м интервале;

t_i– продолжительность i–го интервала;

T – суммарная продолжительность воздействия.

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

$$\boldsymbol{a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}}, \qquad (3.34)$$

где a_v – результирующее корректированное значение виброускорение;

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 находят как геометрическую сумму трёх осевых составляющих:

$$\boldsymbol{a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2}}, \qquad (3.35)$$

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:

$$\boldsymbol{A(8) = a_v\sqrt{\frac{T}{T_0}}}, \qquad (3.36)$$

где $\boldsymbol{A(8)}$ – эквивалентное виброускорение при 8–часовой смене;

$\boldsymbol{a_v}$ – измеренное или рассчитанное значение виброускорения;

$\boldsymbol{T}$ – фактическая продолжительность воздействия, ч;

$\boldsymbol{T_0 = 8}$ ч – продолжительность рабочей смены.

Организация измерений на рабочем месте. 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 3.6.



Рисунок 3.6. – Блок-схема алгоритма комплексной оценки параметров производственного шума на рабочих местах

На первом этапе готовят программу, выбирают участки и объекты, уточняют методику и оформляют документы.

Из шумных участков сначала берут те, от которых зависит работа цеха, с учётом числа людей и жалоб на шум. Рисуют план расстановки оборудования и рабочих мест, собирают паспортные данные машин.

Второй этап – сами измерения. Для шума это эквивалентный, максимальный и пиковый уровни и спектр; для вибрации – корректированное виброускорение по трём осям, длительность и характер воздействия.

Третий этап – расчёт сменной нагрузки. Если смена складывается из нескольких операций, для каждой находят свой уровень и длительность, а затем общий показатель: для шума $\boldsymbol{L_{EX,8ч}}$ – по формуле 3.30, для вибрации $\boldsymbol{A(8)}$ – по формуле 3.36.

Четвёртый этап – сравнение с нормами. Только «соответствует / не соответствует» здесь мало: охрана труда должна предупреждать болезнь, а не фиксировать её. Если значения в норме, но у самой границы, снижать воздействие всё равно надо – особенно при большом стаже, других вредных факторах, напряжённом труде или работе всю смену у машины.

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах устанавливаются «Гигиеническими критериями оценки и классификацией условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса» [275]. Предельно допустимые уровни звукового давления для наиболее характерных видов трудовой деятельности приведены в таблице 3.5.

Примечание: Значения параметров приведены в соответствии с нормативными требованиями СанПиН и руководства по гигиене труда.

В таблице – нормы по октавным полосам от 31,5 до 4000 Гц, а также уровни звука и эквивалентные уровни Lэкв для разных видов работ. Чем больше работа требует сосредоточенности, тем ниже норма: строже всего она для творческой и научной работы, мягче всего – для постоянных мест в цехе и на территории. Именно с этими значениями мы сравнивали результаты наших измерений.

Допустимые эквивалентные и максимальные уровни звука на рабочих местах в производственных и вспомогательных зданиях, на площадках промышленных предприятий, а также в помещениях жилых и общественных зданий и на территориях жилой застройки регламентирует СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» [220].

Таблица 3.5. – Предельно допустимые уровни звукового давления для различных видов трудовой деятельности на рабочих местах

Вид трудовой деятельности / категория рабочих мест	Значения уровней звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровень звука и эквивалентный уровень звука, Lэкв (дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Творческая, научно-исследовательская деятельность, конструирование, проектирование (высокая напряженность труда)	86	71	61	54	49	45	42	40	50
Выполнение высокоточных работ, диспетчерские пункты, кабины управления (повышенная напряженность)	90	75	66	59	54	50	47	45	55
Операторская деятельность, обработка информации на ЭВМ, лабораторный контроль	93	79	70	63	58	55	52	50	60
Кабины водителей грузовых автомобилей, технологического автотранспорта и путевых машин	96	83	74	68	63	60	57	55	70–75
Выполнение всех видов работ на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий	107	95	87	82	78	75	73	71	80

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для разных категорий тяжести и напряжённости труда приведены в таблице 3.6. Соответствующие им предельно допустимые уровни звукового давления в октавных полосах для постоянного шума даны в таблице 3.7.

Таблица 3.6. – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности, дБА

Категория напря–женности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	Легкая фи-зическая нагрузка	Средняя физическая нагрузка	Тяжелый труд 1 степени	Тяжелый труд 2 степени	Тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60			
Напряженный труд 2 степени	50	50			

Составлено на основании требованиями СНиП 23-03-2003 «Защита от шума.

Таблица 3.7. – Предельно допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот для постоянных шумов, соответствующие уровню звука в дБА (по СНиП 23-03-2003)

Уровень звука, L (дБА) / Обозначение Предельного Спектра (ПС)	Значения допустимых уровней звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
50 дБА (ПС-45)	≈ 86	≈ 71	≈ 61	≈ 54	≈ 49	≈ 45	≈ 42	≈ 40	≈ 38
55 дБА (ПС-50)	≈ 89	≈ 75	≈ 66	≈ 59	≈ 54	≈ 50	≈ 47	≈ 45	≈ 43
60 дБА (ПС-55)	≈ 93	≈ 79	≈ 70	≈ 63	≈ 58	≈ 55	≈ 52	≈ 50	≈ 49
70 дБА (ПС-65)	≈ 99	≈ 87	≈ 79	≈ 72	≈ 68	≈ 65	≈ 63	≈ 61	≈ 59
80 дБА (ПС-75)	≈ 107	≈ 95	≈ 87	≈ 82	≈ 78	≈ 75	≈ 73	≈ 71	≈ 69

Составлено на основании требованиями СНиП 23-03-2003 «Защита от шума.

Результаты измерений оформляют протоколом: дата и время, характеристика рабочего места, тип оборудования, режим работы, приборы, точки измерения, метеорологические или микроклиматические условия. Результаты измерения шума удобно сводить в таблицу 3.8.

Таблица 3.8. – Результаты измерения производственного шума

Операция	Продолжительность, ч	Уровень звука, дБА	Вклад воздействие за смену	Итоговый показатель
Работа основного оборудования	$\boldsymbol{t_1}$	$\boldsymbol{L_{A1}}$	$\boldsymbol{t_1 \cdot 10^{0,1L_{A1}}}$	
Обслуживание вспомогательного оборудования	$\boldsymbol{t_2}$	$\boldsymbol{L_{A2}}$	$\boldsymbol{t_2 \cdot 10^{0,1L_{A2}}}$	
Перемещение по участку	$\boldsymbol{t_3}$	$\boldsymbol{L_{A3}}$	$\boldsymbol{t_3 \cdot 10^{0,1L_{A3}}}$	
Итого	$\boldsymbol{T}$		$\boldsymbol{\sum t_i 10^{0,1L_{Ai}}}$	$\boldsymbol{L_{EX,8ч}}$

Результаты измерения вибрации представляют аналогично, в виде таблицы 3.9.

Таблица 3.9. – Результаты измерения вибрации

Операция	Продолжительность, час	$\boldsymbol{a_x}$, м/с^2	$\boldsymbol{a_y}$, м/с^2	$\boldsymbol{a_z}$, м/с^2	$\boldsymbol{a_v}$, м/с^2	$A(8)$, м/с^2
Работа с оборудованием	$\boldsymbol{t_1}$					
Обслуживание механизма	$\boldsymbol{t_2}$					
Перемещение/ожидание	$\boldsymbol{t_3}$					
Итого	$\boldsymbol{T}$					

Полученные результаты измерений и расчётов служат основой для инженерных, организационных и санитарно-гигиенических решений.

Приборы и средства измерения. Достоверные результаты на рабочих местах можно получить только поверенными средствами измерений, внесёнными в реестр средств измерительной техники и имеющими действующие свидетельства о поверке. Прибор выбирают по виду фактора: производственный шум, ультразвук, инфразвук, общая или локальная вибрация, комбинированное виброакустическое воздействие. Он должен соответствовать требуемому классу точности, диапазону измерений и частотному диапазону и фиксировать нормируемые показатели.



Рисунок 3.7. Основные приборы для измерения виброакустических факторов

Шум измеряют шумомерами, интегрирующими шумомерами и анализаторами спектра – ОКТАВА–110А, ОКТАВА–111, Ассистент, Testo 816, SVAN 971, SVAN 977, Brüel & Kjær 2250, RION NL–52 и подобными. Лучше брать приборы 1-го или 2-го класса точности с коррекциями A, C и Z и временными характеристиками Fast, Slow и Impulse. Для рабочего места главный показатель – уровень звука в дБА; чтобы найти источник, нужен октавный и третьоктавный анализ.

Перед замером шумомер проверяют калибратором – эталонным сигналом 94 или 114 дБ на 1000 Гц, и ещё раз после серии. Если показания ушли больше допустимого, серию повторяют. Калибраторы – ОКТАВА–АК–1000, SVAN SV 33, Brüel & Kjær 4231 и другие.

Чтобы узнать, сколько шума получает конкретный человек, используют персональный дозиметр. Его крепят на работнике, и он копит шумовую дозу за смену или за отдельную операцию.

Вибрацию меряют виброметрами и виброанализаторами; датчиком служит акселерометр, превращающий колебания в электрический сигнал. Бывают одноосевые и трёхосевые; для гигиены удобнее трёхосевые – они сразу пишут все три направления $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{z}$.

Для общей вибрации датчик ставят на сиденье, пол, площадку – туда, откуда вибрация идёт в тело. Для локальной – на рукоятку, рычаг, корпус ручной машины. Крепление очень важно: датчик должен сидеть плотно, иначе он покажет не ту амплитуду.

Приборы для вибрации – ОКТАВА–101ВМ, Ассистент Total, SVAN 958, SVAN 106, Brüel & Kjær 4447, Vibrotest, Larson Davis HVM200 и аналогичные. Они измеряют среднеквадратические виброускорение, виброскорость и виброперемещение, вводят частотную коррекцию, считают эквивалентные значения и пишут временные ряды для обработки.

Для вибрации на руках акселерометр крепят к рукоятке через адаптер, ориентируя по осям так, чтобы он не мешал работать. Для общей вибрации применяют сиденьевые датчики, платформы или диски, которые кладут между телом и опорой, – например, между сиденьем и оператором.

Без программного обеспечения тоже не обойтись. Прибор передаёт данные на компьютер, там строятся графики и спектры, считаются эквивалентные уровни и печатаются протоколы. Для научной обработки мы пользовались Microsoft Excel, Python, MATLAB и программами производителей приборов.

Виброаппаратуру калибруют виброкалибратором, который трясёт датчик с известной частотой и амплитудой. Для локальной вибрации это особенно важно: чуть криво поставленный датчик или плохой контакт заметно портят результат.

Приборы, применённые в работе, перечислены в таблице 3.10.

Таблица 3.10. – Основные характеристики приборов для измерения и расчета виброакустических факторов

Измеряемый фактор	Наименование приборов	Измеряемые показатели	Назначение приборов
Производственный шум	Шумомер, интегрирующий шумомер, анализатор спектра	$\boldsymbol{L_A}$, $\boldsymbol{L_{Aeq}}$, $\boldsymbol{L_{max}}$, октавные уровни	Измерение уровня шума и расчет шумовой нагрузки за смену
Индивидуальное воздействие шума	Персональный дозиметр шума	Доза шума, $\boldsymbol{L_{EX,8ч}}$, $\boldsymbol{L_{Aeq}}$	Оценка фактического воздействия шума конкретного работника
Общая вибрация	Виброметр, трехосевой акселерометр, сиденьевый датчик	$\boldsymbol{a_x}$, $\boldsymbol{a_y}$, $\boldsymbol{a_z}$, $\boldsymbol{a_v}$, $\boldsymbol{A(8)}$	Оценка вибрации, передаваемой через сиденье, пол или рабочую площадку
Локальная вибрация	Виброанализатор, акселерометр, адаптер для рукояток	$\boldsymbol{a_{hwx}}$, $\boldsymbol{a_{hwy}}$, $\boldsymbol{a_{hwz}}$, $\boldsymbol{a_{hv}}$, $\boldsymbol{A(8)}$	Оценка вибрации, передаваемой через руки работника
Частотный анализ	Октавный/третьоктавны анализатор, виброанализатор	Спектры шума и вибрации	Выявление доминирующих частот и источников воздействия
Калибровка	Акустический калибратор, виброкалибратор	Контроль чувствительности прибора	Проверка достоверности измерений до и после обследования

С интегрирующими приборами можно не только записать отдельные значения, но и сразу получить сменную дозу и спектр. Тогда оценка условий труда превращается из отчёта для проверяющих в рабочий инструмент управления безопасностью.

Порядок работы в итоге такой: найти источники шума и вибрации, выбрать точки, измерить в реальной работе, посчитать эквивалентные и сменные показатели, сравнить с нормами и наметить меры по снижению риска.

Выводы к третьей главе

1. Выбор литейных алюминиевых сплавов систем Al–Si и Al–Si–Sr, деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–РЗМ), а также слоистых композиционных материалов на их основе обусловлен комплексом их физико-химических, механических и технологических свойств.

2. На основе анализа экспериментальных методов определения характеристик рассеяния энергии при циклической деформации с учетом положений теории акустического излучения обоснован метод свободных затухающих изгибных колебаний. Методика заключается в регистрации и математической обработке осциллограмм переходных процессов свободно подвешенного образца при импульсном (ударном) возбуждении. В качестве основных критериев виброакустической демпфирующей способности материалов приняты скорость затухания звуковых колебаний ($v_{\text{зат}}$) и относительное рассеяние энергии (ψ), а также спектральное распределение уровней звукового давления в третьоктавных полосах частот и эквивалентный уровень звука.

3. Моделирование источников шума и способов возбуждения колебаний на основе законов подобия позволило разработать методики исследования виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов, воспроизводящие соударение деталей машин как причину виброакустических факторов виброударного происхождения.

4. Приведённые методы измерения и расчёта виброакустических факторов на рабочих местах в сочетании с современными интегрирующими приборами позволяют измерять отдельные значения, рассчитывать эквивалентные показатели за смену, строить спектральные характеристики и формировать научно обоснованную базу для оценки профессионального риска на промышленных предприятиях.

ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ И ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Анализ виброакустических и демпфирующих свойств литейных алюминиевых сплавов

Оценка виброакустодемпфирующих и механических свойств литейных алюминиево-кремниевых сплавов системы Al–Si (силуминов) обусловлено их высоким потенциалом при использовании в качестве конструкционных вибродемпфирующих материалов для снижения виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий.

Образцы сплавов заданных составов выплавлялись в корундовых тиглях в интервале температур $\approx 720 \ldots 740$°C. Лигатуры алюминия со стронцием и барием, а также кристаллической сурьмы вводились в расплав после его выдержки в течение $\approx 10 \ldots 20$ мин и тщательного снятия оксидной пленки и шлака с поверхности.

Содержание макро- и микрокомпонентов в образцах контролировали комплексом физико-химических методов: атомно-абсорбционной спектрометрией, нейтронно-активационным анализом, химико-спектральным и масс-спектрометрическим методами.

Для устранения внутрикристаллической ликвации и гомогенизации фазового состава образцы подвергались длительному гомогенизирующему отжигу при температуре $\approx 400 \ldots 450$°C в течение $\approx 200 \ldots 250$ ч. Аттестация микроструктуры и фазового состава производилась методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа (РФА).

Определение механических характеристик (предел прочности $\sigma_в$, предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ) выполнялось по стандартным методикам на универсальной испытательной машине Instron.

Исследования виброакустодемпфирующих свойств литейных сплавов системы Al–Si проводились на испытательной установке ТТУ–2, разработанной

М.М. Хакдодовым, Б.Н. Одиназодой и Ш.А. Бозоровым [241]. Виброакустодемпфирующая способность исследуемых материалов оценивалась по параметрам акустического излучения образцов при ударном (импульсном) возбуждении изгибных колебаний сферическим индентором. Данный подход базируется на том, что переходный акустический процесс и спад звукового давления при единичном импульсе обусловлены суммарным действием внутренних (микроструктурное демпфирование) и внешних диссипативных потерь энергии [278].

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 сплавов

Номер сплава	Содержание компонентов, масс. %				Виброакустодемпфирующие свойства		Механические свойства		
	Si	Mg	Sb, Ba, Sr,	Al	Уровень звука, дБА	Скорость затухания звука d3, дБ/мс	Мпа, σв,	δ, %	НВ
1 2	6 9	0,1 0,3	0,005Sb 0,1Sb	ост –	84 87	3,85 3,46	218 226	7,0 5,6	79 77
3 4	6 9	0,1 0,3	0,005Ba 0,1Ba	– –	81 80	3,88 4,21	196 202	7,4 8,0	74 75
5 6	6 9	0,1 0,3	0,005Sr 0,1Sr	– –	84 82	3,76 4,18	206 212	13,0 12,0	56 58
7 8	9 12	0,25	– –	– –	95 93	2,18 2,42	160 170	3,2 2,4	56 49

Многокомпонентные литейные сплавы Al–Si–(Sb, Ba, Sr) оказались лучше промышленных силуминов АК9 и АК12 – и по прочности, и по способности гасить колебания (таблица 4.1).

Чтобы понять, откуда этот выигрыш, посмотрим на диаграмму состояния Al–Si (рисунок 4.1) [279].

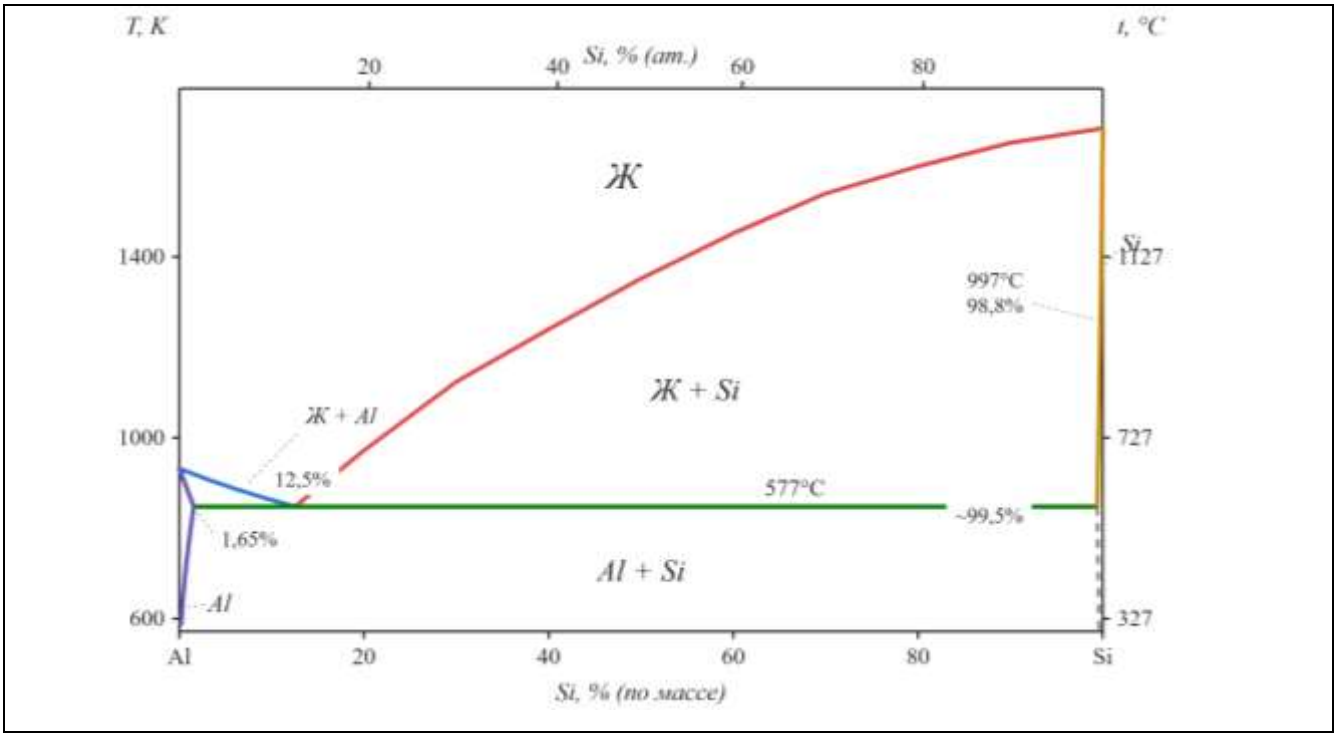


Рисунок 4.1. – Диаграмма состояния сплавов системы Al–Si

На рисунке 4.1 проиллюстрировано ключевое физико-химическое свойство сплавов системы Al–Si: растворимость кремния в алюминиевой матрице является переменной и с понижением температуры от эвтектической $T_{эвтек} \approx 577°C$ до нормальной $T \approx 20°C$ резко уменьшается – с $\approx 1{,}65$ мас. % до величин менее $\approx 0{,}05$ мас. %. В условиях равновесной кристаллизации и естественного охлаждения избыточный кремний выделяется в виде грубокристаллических включений. Поскольку двойные силумины без добавок меди или магния не подвержены классическому дисперсионному твердению (термоупрочнению), их прочностные показатели остаются ограниченными [278].

Прочность, пластичность и вибродемпфирующую способность сплавов Al–Si повышают, измельчая кристаллы эвтектического кремния. В металловедческой практике для этого используют три основных приёма:

– интенсификацию охлаждения, то есть повышение скорости кристаллизации расплава при кокильном литье или литье под давлением;

– микролегирование (модифицирование), то есть введение микродобавок (сотые доли масс. %) щелочных и щелочноземельных металлов (Na, Li, Ba, Sr), улучшающих комплекс механических и виброакустических свойств [279];

– физическое воздействие на расплав путём наложения внешних энергетических полей: низкочастотной вибрации или ультразвуковой обработки (УЗО) в процессе затвердевания [280–282].

В промышленном производстве наибольшее распространение получило химическое модифицирование добавками натрия, бария и стронция [283, 284]. Введение $\approx 0{,}01$ мас.% Na Na (в виде солевого флюса $2/3\mathrm{NaF} + 1/3\mathrm{NaCl}$) диспергирует кристаллы эвтектического кремния, смещает эвтектическую точку в сторону больших концентраций кремния и приводит к формированию тройной эвтектики [α-Al + Si + AlSiNa].

Стронций модифицирует сплав аналогично [283], но технологически и экологически выгоднее, поскольку его вводят в расплав готовой лигатурой Al–Sr, без выделения токсичных фтористых и хлористых газов (F2, Cl2), неизбежных при солевой обработке натрием.

В качестве эффективных модификаторов и дегазаторов силуминов также применяются сурьма (Sb) и барий (Ba) [283–286]. Сурьма вводится в количестве $\approx 0{,}05 \ldots 0{,}2$ мас. %. Обладая предельно низкой растворимостью в твердом алюминии $<\approx 0{,}01$ мас. %, сурьма эффективна в заэвтектических силуминах, где она подавляет образование грубых первичных выделений кремния.

Физико-химическую природу модифицирования раскрывает алюминиевый угол тройной диаграммы состояния Al–Si–Sr (рис. 4.2) [283].

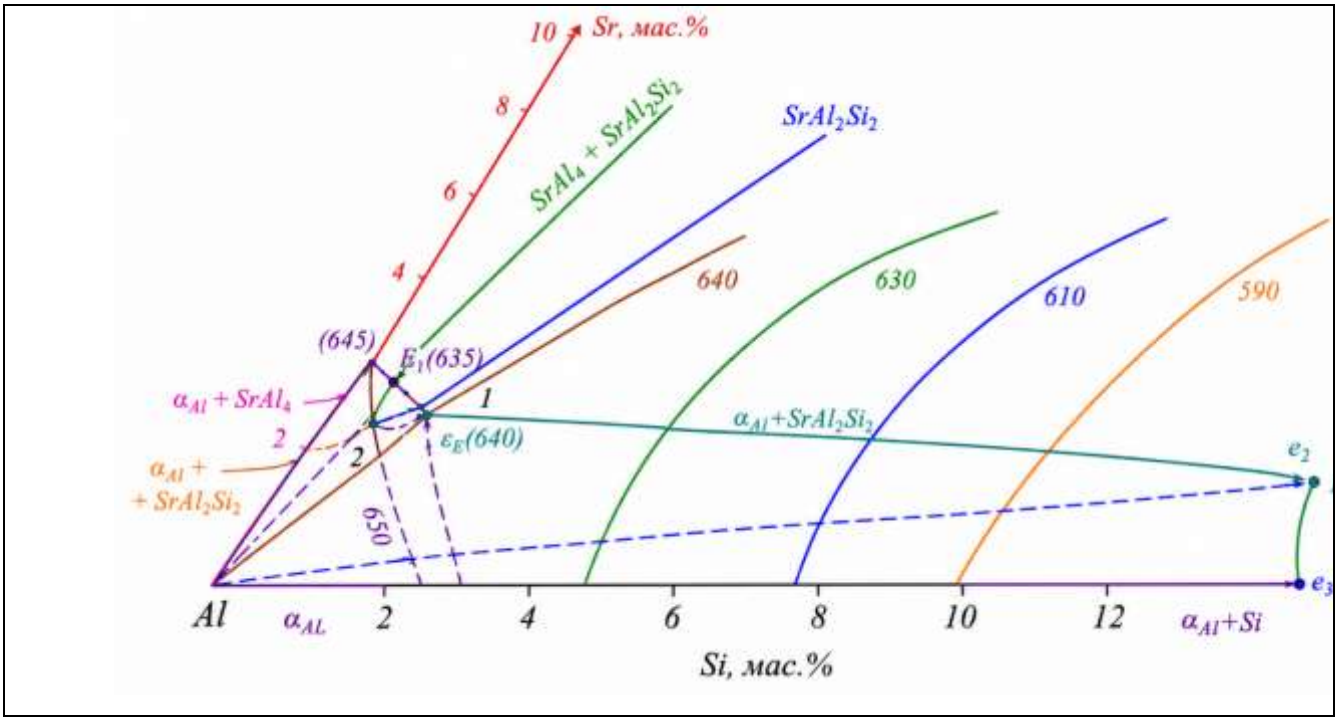


Рисунок 4. 2. – Алюминиевый угол тройной системы Al–Si–Sr

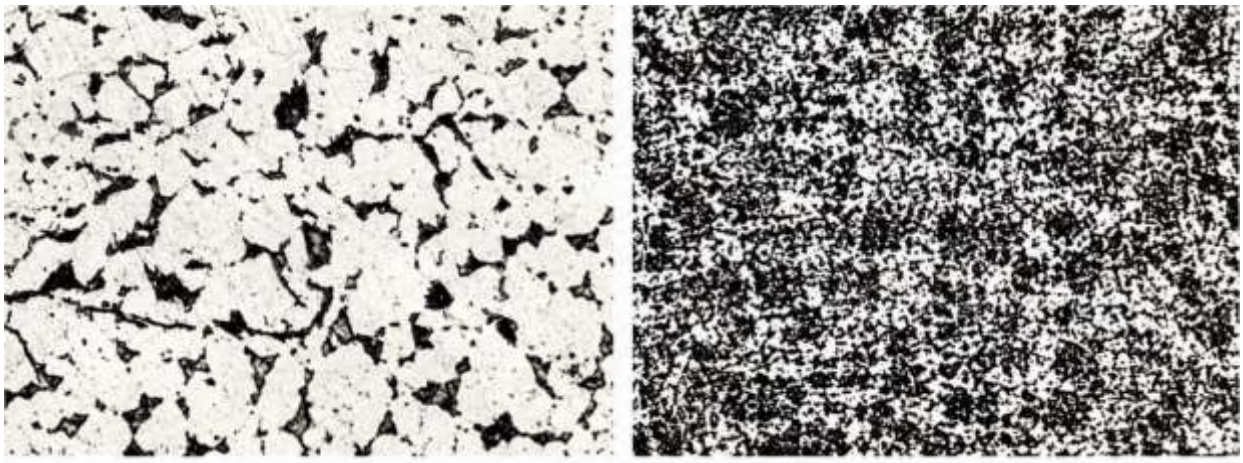
Вопросам совместного и раздельного влияния стронция и бария на структуру, кристаллохимические параметры и механические свойства сплавов системы Al–Si ввиду близкого физико-химического сродства этих щелочноземельных металлов посвящены работы [284–287].

В рамках настоящего исследования сурьма (Sb) была выбрана в качестве модифицирующего компонента для алюминиево-кремниевых силуминов благодаря ее способности измельчать фазовые составляющие двойной эвтектики [α-Al + Si]. Сурьма проявляет высокую поверхностную активность на зародышах кристаллов кремния, превосходя по эффективности диспергирования барий и стронций.

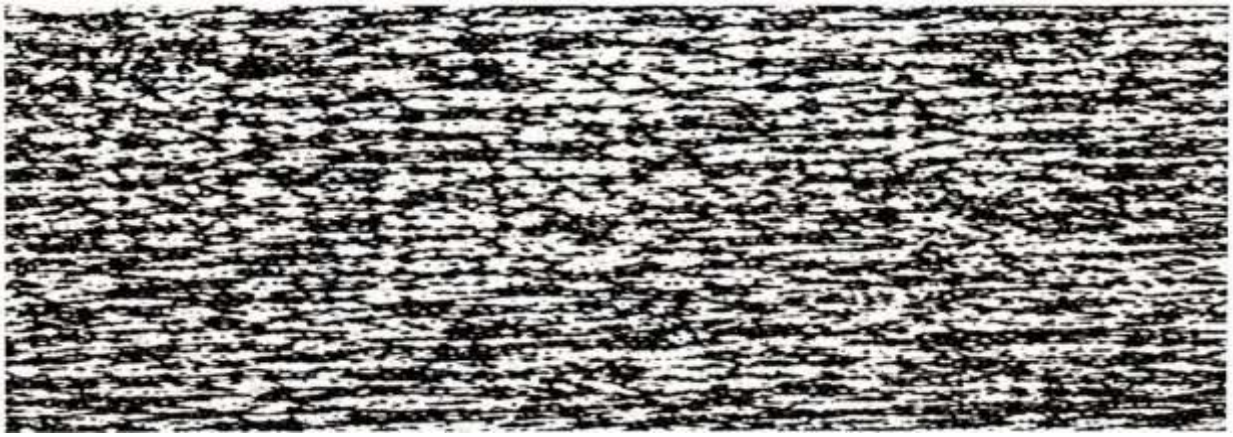
Кристаллизации сплавов системы Al–Si–Sb, соответствующей алюминиевому углу тройной системы, благоприятствует кинетическое переохлаждение расплава. После введения модификатора формируется тройная эвтектическая фаза $E_2 = \left[\alpha\text{-Al} + \text{Si} + \text{Al}_x\text{Si}_y\text{Sb}_z\right]$, обладающая более высокой микропластичностью и вязкостью. Для сплавов системы Al–Si–(Sb, Ba, Sr), составы которых располагаются вблизи квазибинарной линии E_2-Al (рис. 4.2), именно присутствие этой равномерно распределенной пластичной фазы обеспечивает

существенное усиление видроакустодемпфирующей способности за счет роста микропластической деформации и сдвигового трения на межфазных границах.

Микроструктуры экспериментальных образцов сплавов системы Al–Si до и после модифицирования приведены на рисунке 4.3.



а) б)



в)

Рисунок 4.3. – Микроструктура сплавов системы Al+Si, модифицированные Sr (а), Ba (б) и Sb (в)

Акустические характеристики исследуемых сплавов представлены на рисунке 4.4.

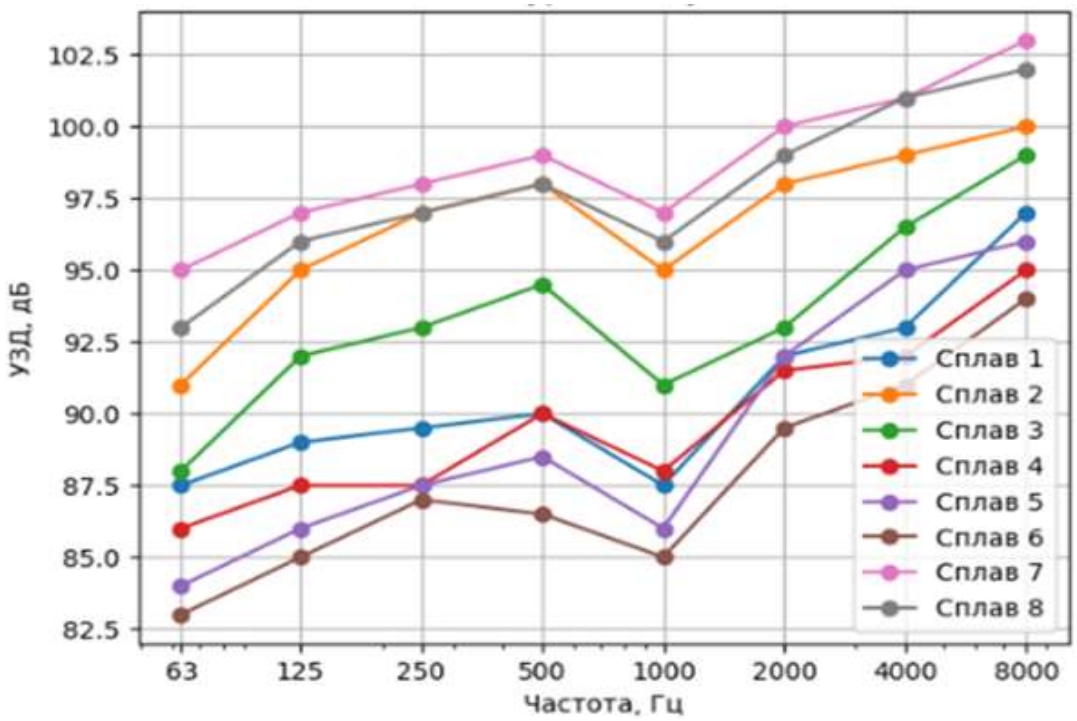


Рисунок 4.4. – Звукоизлучение исследуемых сплавов

Как следует из спектрального анализа третьоктавных полос частот (рисунок 4.4), все сплавы системы Al–Si, модифицированные сурьмой, барием и стронцием, характеризуются существенно более низкими уровнями звукового излучения по сравнению с немодифицированным базовым сплавом.

Больше всего уровень падает в октавной полосе 1000 Гц – той, к которой ухо наиболее чувствительно. Прочность модифицированных сплавов при этом не пострадала.

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

Мы объясняем это с позиций теории кристаллизации и модифицирования силуминов [288–293]. 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.

Таблица 4.2 – Виброакустодемпфирующие и механические свойства исследуемых литейных сплавов

№ сплава	Предел прочности σB, МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость НВ	Скорость затухания звука d3, дБ/мс	Коэффициент потерь η
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

Рисунок 4.4 и таблица 4.2 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.

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. Оценка влияния модифицирующих добавок на виброакустические характеристики алюминиево–кремниевых литейных сплавов

Мы видели, 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.

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

Результаты представлены на рисунках 4.5–4.7.

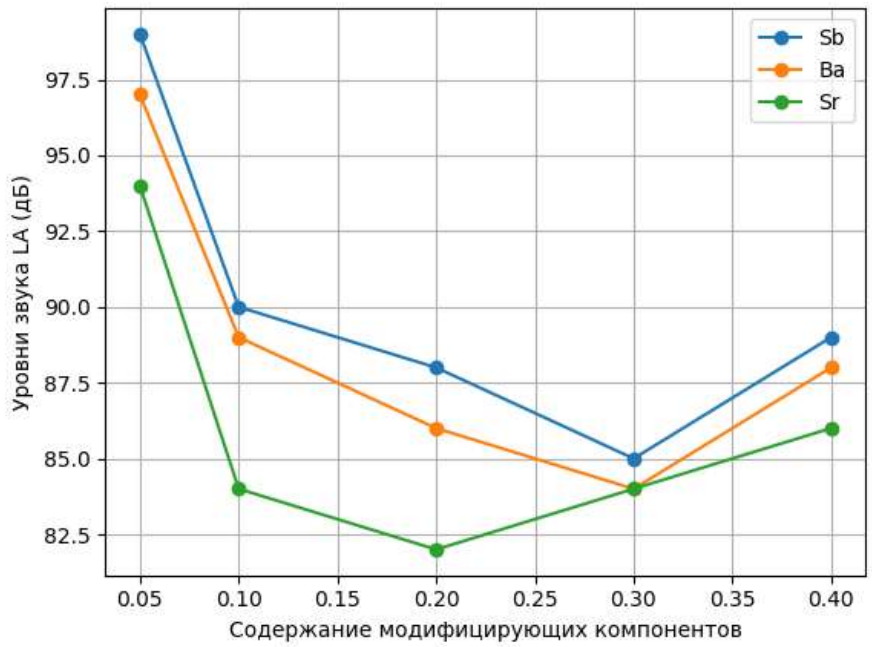


Рисунок 4.5. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на урони звука LA сплава Al–6%Si (Sb, Ba, Sr)

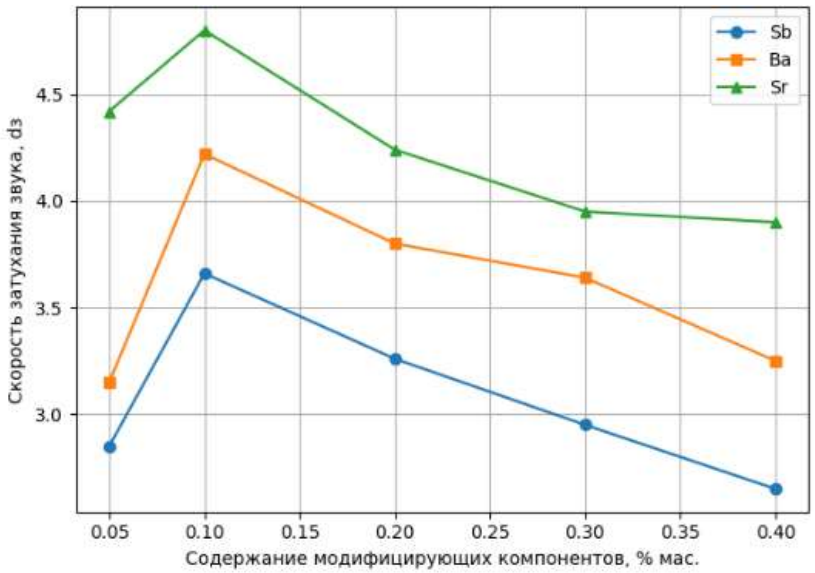


Рисунок 4.6. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на скорость затухания звука dз в сплавах Al–9%Si

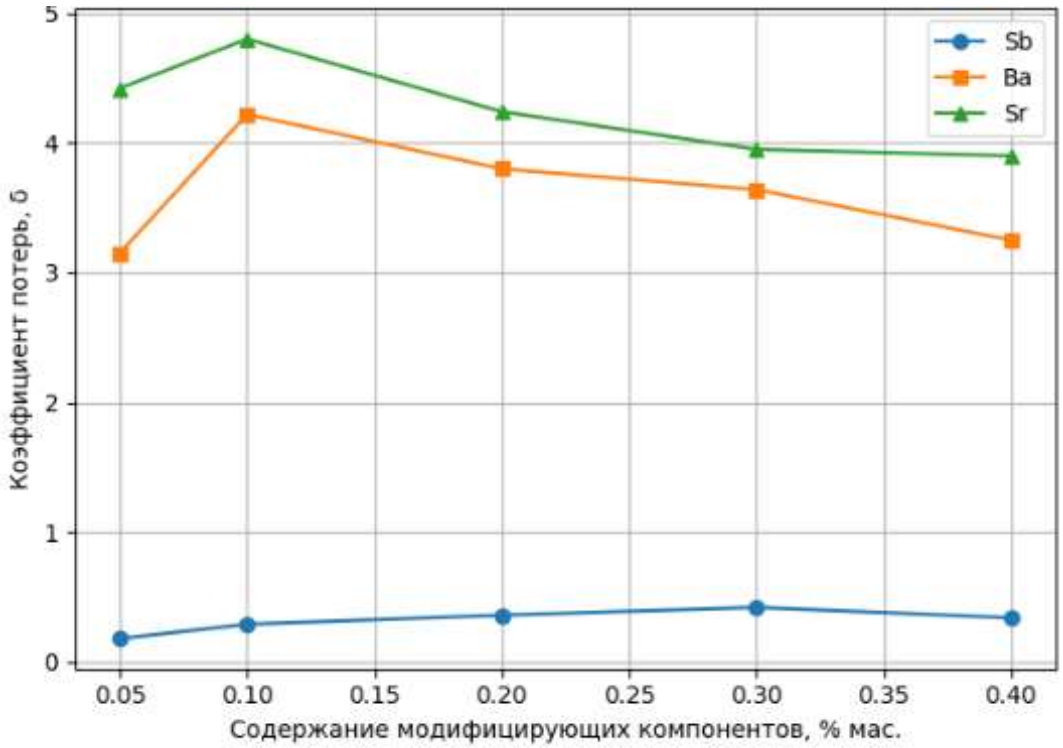


Рисунок 4.7. – Влияние содержание модифицирующих компонентов на коэффициент потерь, $\boldsymbol{\delta}$ сплава АК 12.

Комплекс проведённых исследований (рисунки 4.5–4.7) позволяет заключить, 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 [279, 283].

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. – Механические свойства сплава АК 9 в зависимости от содержание модифицирующих компонентов

Содержание модифицирующих компонентов, % мас.	Предел прочности σв, Мпа	Предел текучести δ, %	Твердость, НВ
0,05	192	7,2	56
0,1	200	6,4	68
0,2	212	6,2	66
0,3	216	6,0	58
0,4	220	5,2	52

Виброакустодемпфирующие свойства сплавов АК9 и АК12, модифицированных стронцием, в зависимости от времени выдержки расплава приведены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4. – Зависимость виброакустодемпфирующих свойств (LA, dз, δ) от времени выдержки для сплава АК 9 (Sr)

Время выдержки, час	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука, dз,	Коэффициент потерь, δ
2	86	3,8	0,42
4	84	4,0	0,46
6	82	4,5	0,52
8	80	5,2	0,60

Таблица 4.5.– Зависимость виброакустодемпфирующих свойств (LA, dз, δ) от времени выдержки для сплава АК 12 (Sr)

Время выдержки, час	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука dз	Коэффициент потерь, δ
2	88	3,0	0,36
4	85	3,4	0,39
6	81	3,8	0,42
8	79	4,2	0,48

Та же картина наблюдается при разном числе циклов переплавки (таблицы 4.6 и 4.7). Время выдержки и количество переплавов, как видно, влияют на виброакустические характеристики сплавов АК9 и АК12 разного состава.

Таблица 4.6. – Зависимость виброакустических демпфирующих свойств (LA, dз, δ) от времени выдержки расплава для сплава АК 9 (Sr).

Количество переплавов	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука, dз,	Коэффициент потерь, δ
1	84	3,9	0,25
2	82	4,2	0,38
3	88	4,6	0,42
4	81	5,0	0,44

Таблица 4.7. – Зависимость виброакустодемпфирующих свойств (LA, dз δ) от времени выдержки расплава для сплава АК 12 (Sr)

Количество переплавов	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука, dз,	Коэффициент потерь, δ
1	84	3,6	0,31
2	82	4,0	0,36
3	88	4,5	0,44
4	81	5,1	0,48

Такое поведение, вероятно, связано с улучшением физико-механических свойств сплавов [286]. Механические показатели всех исследованных сплавов (таблицы 4.8 и 4.9) достаточно высоки.

Таблица 4.8. – Механические свойства (σв, δ, НВ) для сплава АК 12 (Sr) в зависимости от времени выдержки расплава

Время выдержки, час	Предел прочности, σв, Мпа	Относительное удлинение, δ, %	Твердость, НВ
2	200	12	56
4	202	10	60
6	206	9	62
8	208	8	68

Таблица 4.9. – Механические свойства (σв, δ, НВ) для сплава АК 12 (Sr) в зависимости от количества переплавов расплава

Время выдержки, час	Предел прочности, σв, Мпа	Относительное удлинение δ, %	Твердость, НВ
1	203	11	56
2	206	10	60
3	208	9	62
4	210	8	68

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

Результаты исследований, приведенные в предыдущем подразделе, убедительно показывают, что виброакустические характеристики и механические свойства литейных алюминиево-кремниевых сплавов претерпевают существенные изменения в зависимости от концентрации вводимых модифицирующих компонентов (Sb, Sr, Ba), а также от параметров термической и физико-химической обработки их расплавов. Поэтому определение температуры и влияние различных видов обработки имеет важное практическое значение, поскольку изменение температуры оказывает влияние практически на все физико–механические характеристики сплавов, определяющие условия эксплуатации реальных конструкций.

Как было показано в главе 2, разработанная установка позволяет нагревать образцы в ходе испытания 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 4.10.

Таблица 4.10. – Влияние температуры на виброакустодемпфирующие свойства сплава АК 9 (Sb, Ba, Sr)

Температура испытания, оС	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука dз,	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

С повышением температуры виброакустодемпфирующие свойства модифицированного сплава АК9 заметно растут (таблица 4.10). 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 [283].

В разделе 4.1 отмечалось, что «…на качество и свойства металлов и сплавов положительное влияние оказывают различные физические воздействия на расплав, такие как вибрация и ультразвук» [280–282]. Поэтому в задачу исследования входило и определение виброакустических и механических характеристик сплавов, полученных с таким воздействием на расплав.

Вибрационную обработку проводили на установке [282]: 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 4.11.

Таблица 4.11. – Оценка влияние вибрационной обработки расплава на виброакустические и демпфирующие свойства сплава АК 9 (Sr) до и после обработки

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

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 4.12.

Таблица 4.12. – Влияние ультразвуковой обработки расплава на виброакустодемпфирующие свойства сплава АК 9 (Sr) до и после обработки

Сплавы	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука, dз	Коэффициент потерь, δ
АК 6	$\frac{82}{84}$	$\frac{4,01}{3,76}$	$\frac{0,51}{0,48}$
АК 9	$\frac{80}{81,5}$	$\frac{3,96}{3,88}$	$\frac{0,56}{0,50}$
АК 12	$\frac{76}{80}$	$\frac{4,12}{4,02}$	$\frac{0,58}{0,51}$

Вибрационная и ультразвуковая обработка расплава, как видно из таблиц 4.11 и 4.12, 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. Анализ виброакустодемпфирующих 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» [258]. Их свойства в разной мере зависят от количества легирующих компонентов, состояния структуры, содержания и соотношения цинка и магния (рисунок 4.8).

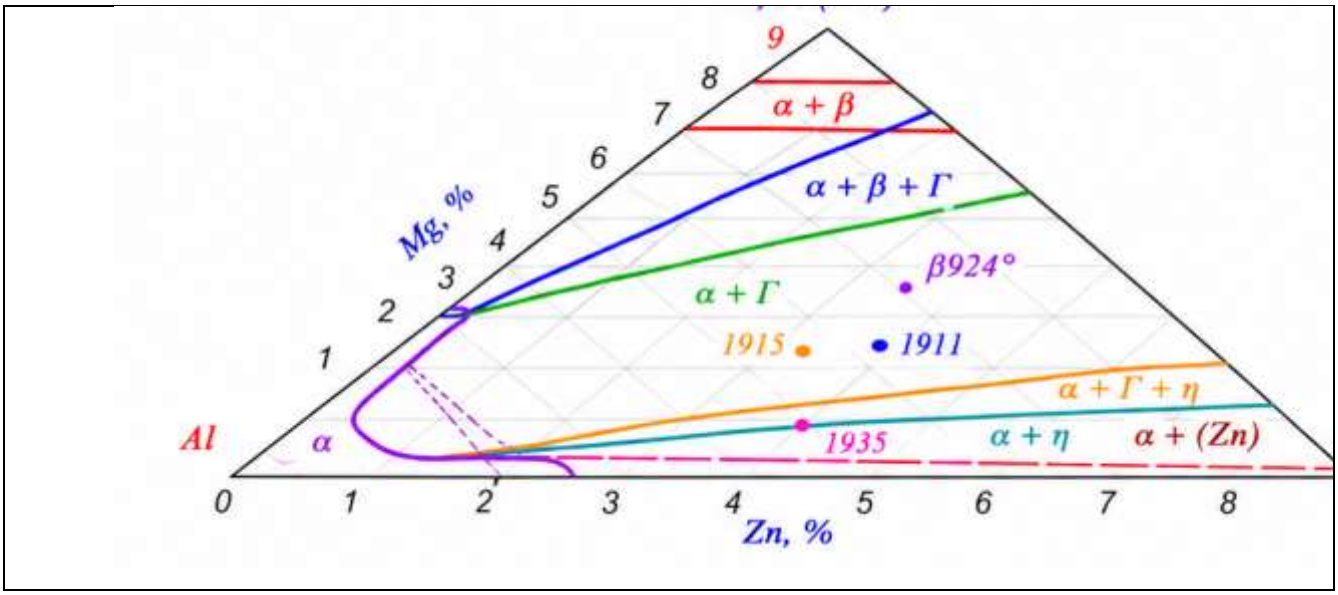


Рисунок 4.8. Изотермический разрез сплавов системы Al–Zn–Mg

Как видно из рисунка 4.8 «При 440°C все промышленные составы лежат в области α-твердого раствора с суммой (Zn+Mg) ≤ 8,2% мас.; по этому признаку их делят на относительно низколегированные (суммарно не более 5,2–6,5% мас. цинка и магния) и сплавы с суммой 6,5–8,2% мас., причем отношение Zn:Mg варьируется от 0,7 до 4» [259].

Согласно [259], «Диаграмма Al–Zn (рис. 4.9) содержит два нонвариантных равновесия: эвтектическое L–Al+β при 382°C и монотектоидное α_1–α+β при 275°C» [260]. Критическая точка бинодали, замыкающей двухфазную область (α+α_1), лежит при 351,5°C и 39,5% ат. Zn; предельная растворимость Al в Zn при эвтектической

температуре 382°C равна 2,5% ат., а Zn в Al – 33,5% ат. По данным [261], при старении закаленных сплавов Al–Zn с 6–30% ат. Zn существует эвтектоид с 59,4% ат. Zn при 275 °C, и рассеяние в этом случае связано скорее с проскальзыванием по межфазным границам, чем по границам Zn–Zn внутри одной фазы» [259].

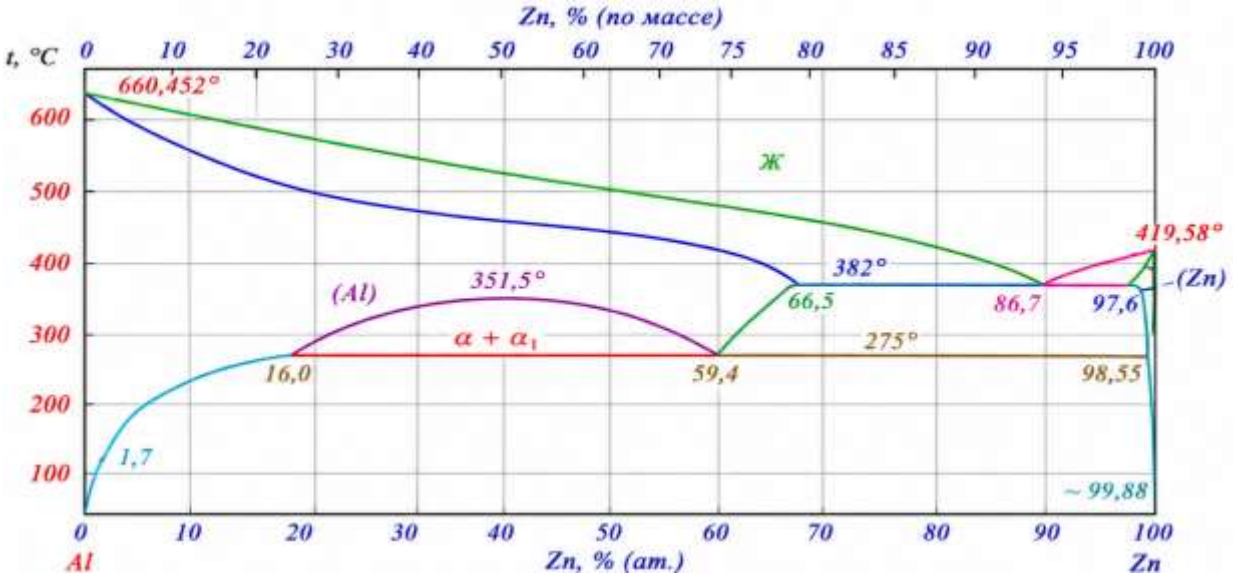


Рисунок 4.9. Диаграмма состояния сплавов системы Al–Zn

Характерные закономерности прослеживаются и на диаграммах состояния систем Al–Mg, Mg–Zn и Al–РЗМ [198–200, 262–264].

Как отмечено в работе Никифорова А.С. «…в сплавах системы Al–Mg максимальная растворимость магния в алюминии достигает 17,4% ат. Mg при температуре 450°C. В сплавах же системы Mg–Zn, богатых магнием, наблюдается эвтектическое равновесие при 343°C и содержании 51,6% мас. Zn, причем растворимость цинка в магнии составляет 8,4% мас. при 340°C, а при понижении температуры до 200 °C сокращается до 2,0% мас. Zn» [204].

Системы Al–РЗМ (алюминий — редкоземельный металл), согласно диаграммам фазового равновесия [263, 264], относятся к эвтектическому типу и образуют от двух до шести интерметаллических соединений.

Растворимость алюминия в редкоземельных металлах крайне незначительна и не превышает ≈ 0,2 мас., %. Максимальная предельная растворимость самих редкоземельных металлов в алюминиевой матрице составляет: для иттербия (Yb)

при эвтектической температуре – \≈ 0,2 ... 0,3 мас., % для неодима (Nd) при нормальной (комнатной) температуре ($T \approx 20°C$) – ≈ 0,2 мас., %; для скандия (Sc) при нормальной температуре ($T \approx 20°C$) – ≈ 0,85 мас., %.

При повышении температуры до эвтектической точки растворимость указанных элементов (Sc, Yb, Nd) в алюминиевой матрице существенно возрастает и достигает ≈ 2 ... 3 мас., %. В то же время растворимость большинства других редкоземельных металлов (церия Ce, лантана La, празеодима Pr и др.) в твердом алюминии остается крайне низкой и при нормальной температуре $T \approx 20°C$ не превышает ≈ 0,1 ... 0,2 мас., %.

Как показано в работе, «…малая растворимость редкоземельных металлов в алюминии для сплавов системы Al–Zn–Mg компенсируется повышенной растворимостью их в магниевой фазе. Так например, в сплаве системы Al–Zn–Mg–Y, 13,0 % мас. иттрия растворяется в магнии при 557оС, растворимость Al в Mg при 437оС составляет 12,6 % мас., когда растворимость цинка в магнии при 343оС составляет всего 8, 4% мас» [262].

Особенности взаимодействия компонентов в сплавах Al–Zn–Mg показывают, что обоснованный подбор легирующих элементов и микродобавок РЗМ позволяет регулировать физико-химические и технологические свойства сплавов, в том числе виброакустодемпфирующие. По литературным данным, демпфирующие свойства технических алюминиевых сплавов во многом определяются фазовым составом и микроструктурой, которые, в свою очередь, зависят от концентрации легирующих элементов и характера их взаимодействия с алюминиевой матрицей.

Исследования, обобщенные в работах [74, 265], показывают, что алюминиевые сплавы, легированные элементами с незначительной растворимостью в твердом состоянии (такими как железо Fe, титан Ti, хром Cr, цирконий Zr, церий Ce и марганец Mn), а также сплавы систем с высокой растворимостью (Al–Mg, Al–Zn, Al–Cu), как правило, демонстрируют низкие базовые демпфирующие свойства в состоянии твердого раствора. Авторы работ [74,

265] связывают этот эффект с тем, что «…понижение демпфирующих свойств сплавов обусловлено увеличением концентрации твердого раствора, тогда как повышение демпфирующих характеристик зависит от уменьшения концентрации твердого раствора с одновременным образованием избыточных вторичных фаз» [74, 265]. В то же время, как полагают авторы [74, 265], в ряде модельных бинарных и тройных систем, таких как Al–Sn и Al–Zn, а также в сплавах систем Al–Zn–Mg при низком содержании цинка и магния (до $\approx 1 \ldots 2$ мас. %), изначально наблюдается относительно высокий уровень демпфирования. С дальнейшим увеличением концентрации легирующих добавок демпфирующая способность алюминиевых сплавов сначала снижается, достигая минимума, а затем снова возрастает.

Легирование алюминиевых сплавов редкоземельными металлами (РЗМ), по данным ряда авторов, повышает и демпфирующую способность [111–113]. Имеются, в частности, сведения о положительном влиянии добавок РЗМ на демпфирование сплавов системы Al–Fe, что указывает на возможный рост демпфирования при введении РЗМ в матрицу с низкой растворимостью. Механизмы действия иттербия и гадолиния (измельчение зерна и упрочнение твёрдого раствора) рассмотрены в разделе 1.5.1 [101–106].

Учитывая особенности фазовых превращений в высокопрочной системе Al–Zn–Mg и известное влияние редкоземельных металлов (РЗМ) на структуру и демпфирование алюминия, мы проверили, как на способность сплава гасить вибрацию влияют содержание цинка и магния, их соотношение, количество РЗМ и режимы обработки, а также как свойства исходного сплава переходят в композит.

Плавили в корундовых тиглях. Шихта – алюминий разной чистоты, металлические магний и цинк и заранее приготовленные алюминиевые заготовки с 2–6 % гадолиния или иттербия. Основу расплавляли отдельно при 750–800 °C, затем вводили легирующие с РЗМ, давали постоять 10–20 минут, чтобы всё разошлось, и дважды рафинировали хлоридом марганца (0,3 % от объёма). Отливали в

металлические формы плоские блоки 150 × 50 × 5 мм; на них и изучали структуру, механику и акустику по методикам главы 3.

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 (деформированном) состоянии, приведены на рисунках 4.10 и в таблице 4.13. В качестве ключевых виброакустических и демпфирующих параметров образцов приняты:

– характеристики акустического излучения – пиковое звуковое давление p, октавные и эквивалентные уровни звука $L_{экв}$;

– диссипативные показатели материала – скорость затухания звуковых колебаний $v_{зат}$, логарифмический декремент $\delta_{зат}$ и коэффициент механических потерь η.

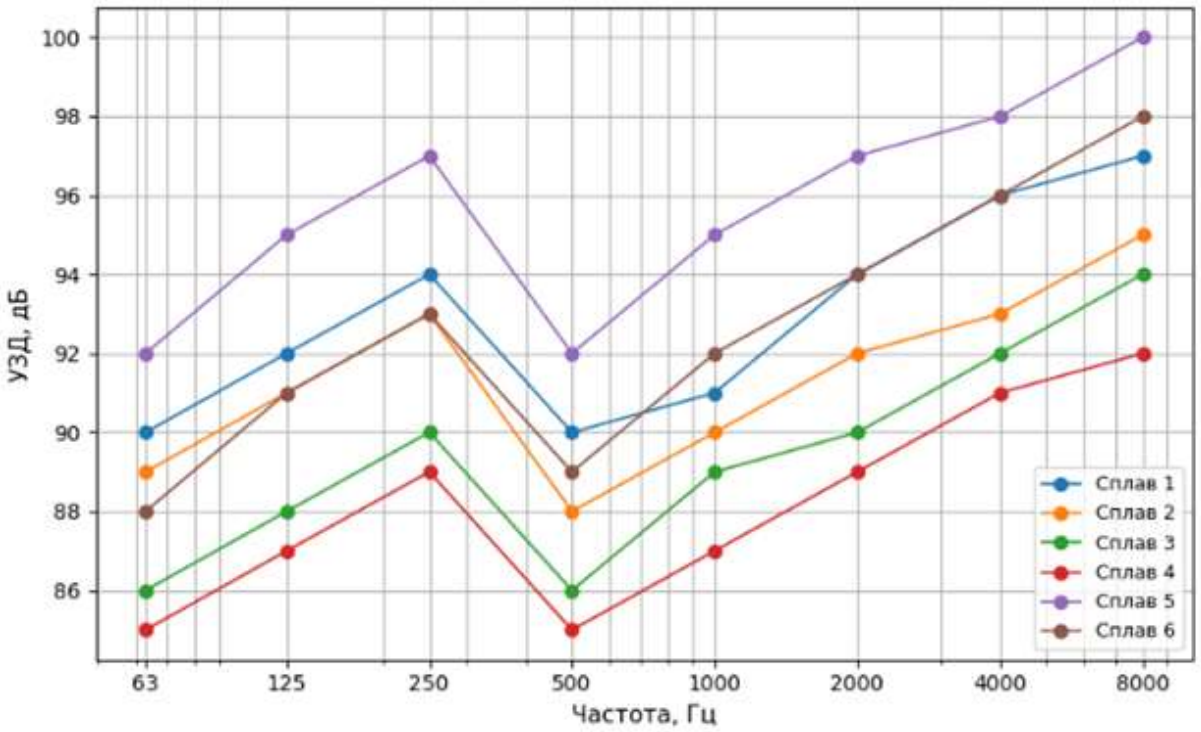


Рисунок 4.10. – Акустические характеристики сплавов

Данные, приведенные на рисунке 4.10, показывают, что акустические свойства (частотная зависимость уровня звукового давления и общего уровня звука) исследуемых сплавов существенно зависят от их состава: снижения содержания цинка до $\approx 2 \ldots 8$ мас., % и магния – до $\approx 1 \ldots 3$ мас., %, а также введения минимальных микродобавок редкоземельных металлов в диапазоне $\approx 0{,}05 \ldots 0{,}10$ 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 4.13).

Особенности взаимодействия компонентов в сплавах Al–Zn–Mg и результаты, обобщённые на рисунке 4.10 и в таблице 4.13, требуют более детально рассмотреть, как содержание цинка, магния и микродобавок РЗМ влияет на виброакустические характеристики и механические свойства сплавов.

Таблица 4.13. – Виброакустические и демпфирующие 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

Как следует из таблицы 4.13, при содержании цинка $\approx 2 \ldots 8$ мас., % и магния $\approx 1 \ldots 3$ мас., %, а также при минимальном введении микродобавок редкоземельных металлов в пределах $\approx 0{,}05 \ldots 0{,}10$ мас., %, скорость затухания звука и коэффициент потерь в материале значительно повышаются.

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 4.14 и 4.15. Как видно из таблицы 4.14, 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., %.

Таблица 4.14. – 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

По магнию максимум значений показали сплавы с 1–2 % мас. Mg (таблица 4.15).

Таблица 4.15. – Влияние содержание магния на виброакустодемпфирующих свойств сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Mg, %мас.	Уровень звук, LA	Скорость затухания звука, dз	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

Существенно влияет на виброакустодемпфирующую способность и соотношение цинка и магния (таблица 4.16). Лучшие значения уровня звука, скорости затухания звука и коэффициента потерь достигаются при соотношении Zn:Mg = 2:1.

Таблица 4.16. – Влияние соотношение цинка в магний на виброакустодемпфирующие свойства сплавов Al–Zn–Mg

Соотношение цинка в магний	Уровень звук, LA	Скорость затухания звука, dз	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 содержания цинка и магния заметно сказывается и на механических свойствах (табл. 4.17–4.18).

Таблица 4.17. – Влияние содержание цинка на механические свойства сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Zn, %мас.	Предел прочности σв, Мпа	Предел текучести δ, %	Твердость, НВ
2,0	600	7,4	78
4,0	620	6,8	72
6,0	624	5,6	70
8,0	632	4, 8	66

Таблица 4.18. – Влияние содержание магния на механические свойства сплавов Al–Zn–Mg

Содержание Mg, %мас.	Предел прочности σв, Мпа	Предел текучести δ, %	Твердость, НВ
2,0	590	6,6	74
4,0	600	6,0	68
6,0	610	5,8	62
8,0	622	5, 2	64

С изменением содержания цинка и магния механические свойства сплавов улучшаются (таблицы 4.17 и 4.18); при этом цинк влияет на пластичность сплавов с высокими виброакустодемпфирующими свойствами (таблица 4.17).

Влияние микродобавок редкоземельных металлов (гадолиния и иттербия) на виброакустодемпфирующие свойства сплавов показано на рисунках 4.11–4.13.

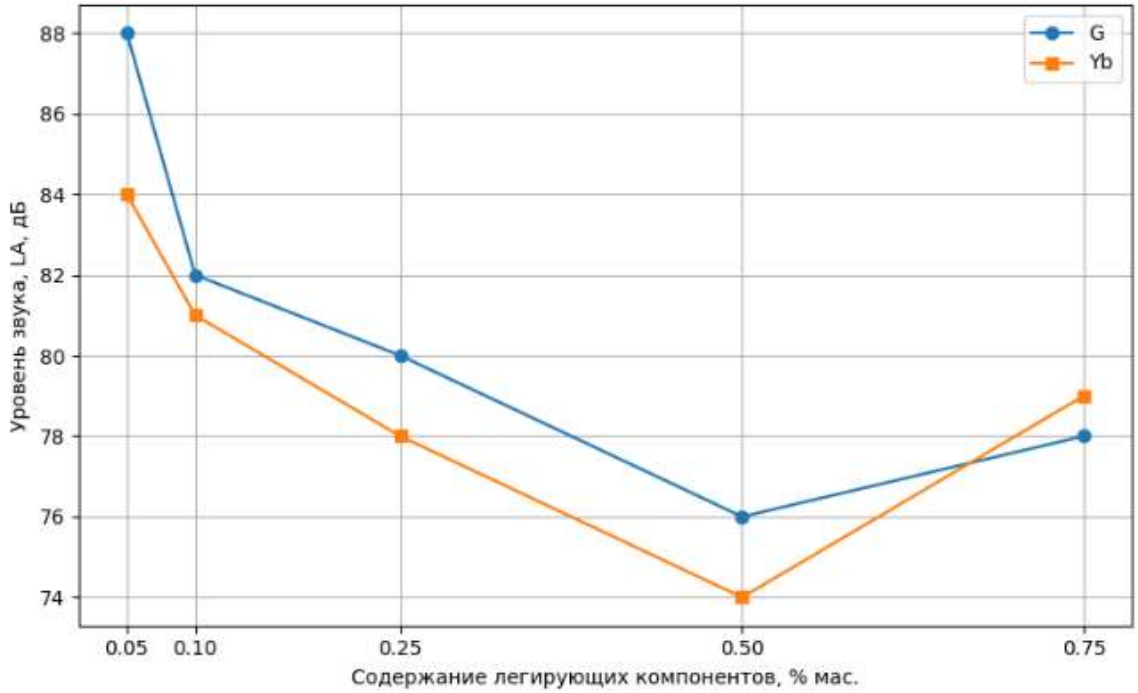


Рисунок 4.11. – Влияние содержание микродобавок гадолиния и иттербия на урони звука LA сплавов системы Al–Zn–Mg

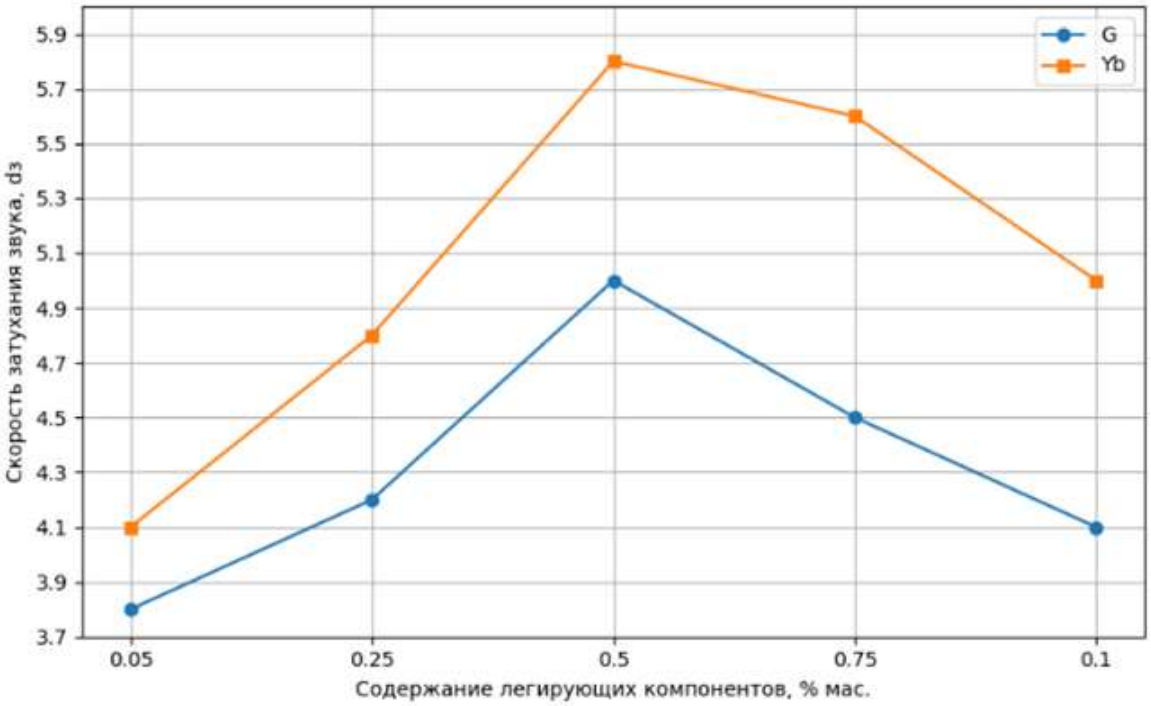


Рисунок 4.12. – Влияние содержание микродобавок гадолиния и иттербия на скорость затухания звука dз в сплавах Al–Zn–Mg

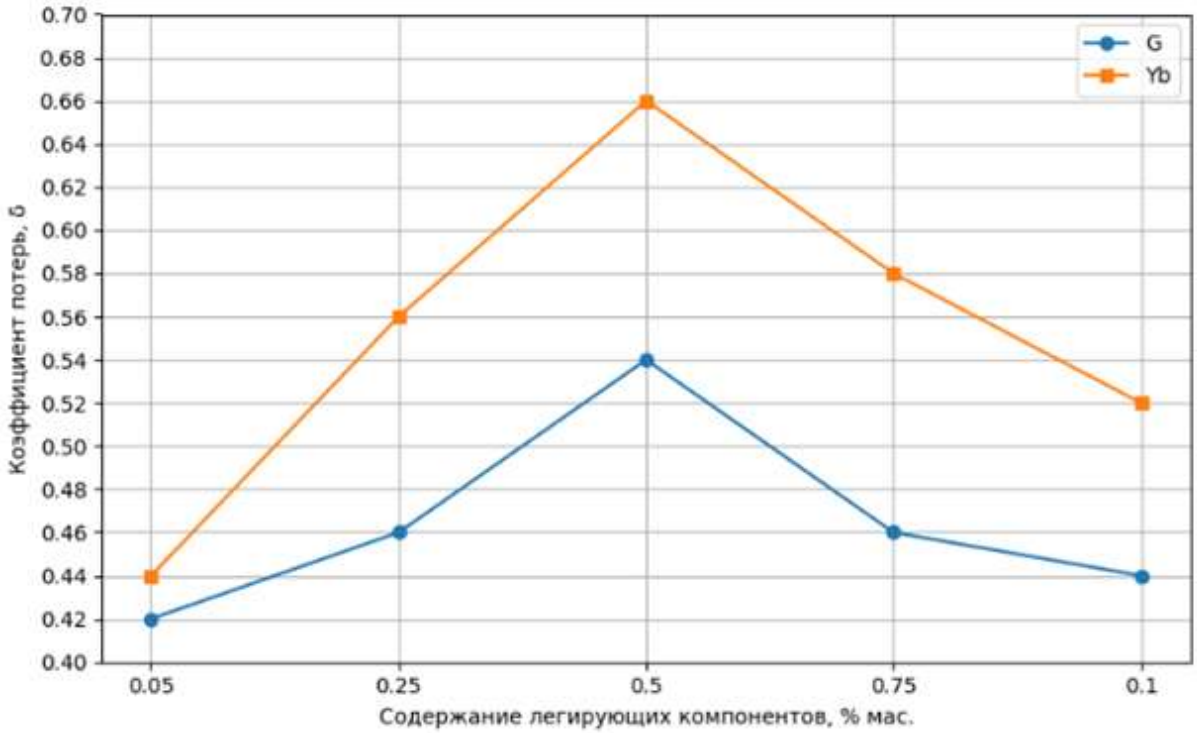


Рисунок 4.13. – Влияние содержание микродобавок гадолиния и иттербия на коэффициент потерь, $\boldsymbol{\delta}$ сплава Al–Zn–Mg

Микродобавки гадолиния и иттербия вместе с цинком и магнием улучшают виброакустодемпфирующие характеристики сплавов (рисунки 4.11–4.13). 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. Влияния температуры на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Как и у литейных сплавов (раздел 4.1.1), 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 °С приведены в таблице 4.19.

Таблица 4.19. – Зависимость влияние температуры на виброакустодемпфирующие свойства сплава Al–Zn–Mg с содержанием 0,5 % мас. микродобавок гадолиния и иттербия

Температура испытания, оС	Уровень звука, LA	Скорость затухания звука, dз,	Коэффициент потерь, δ
100	74	5,5	0,56
150	72	5,8	0,62
200	74	6,2	0,68
250	68	6,8	0,72
300	62	7,0	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 влияния различных видов обработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Деформируемые сплавы Al–Zn–Mg, как показано в предыдущих разделах, уже в литом состоянии обладают высокими виброакустодемпфирующими и механическими свойствами.

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 [266–268]. 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 4.20.

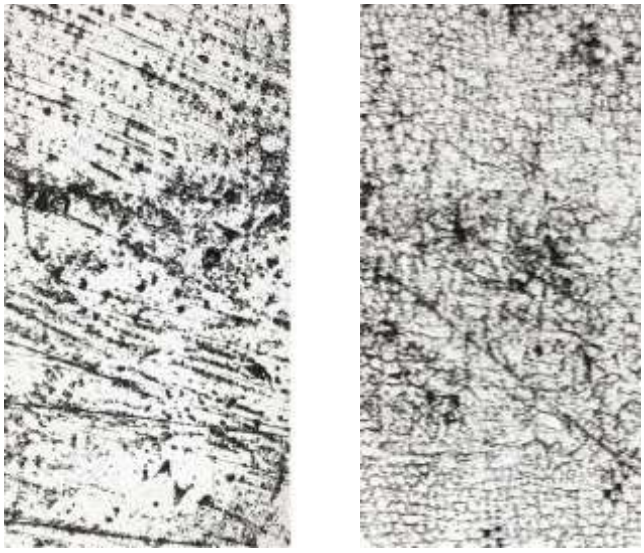
Таблица 4.20. – Влияние степени пластической деформации на гашение вибраций и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

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

Анализ данных таблицы 4.20 свидетельствуют о существенном влиянии пластической деформации в диапазоне $\approx 10 \ldots 30\%$ на свойства исследуемых сплавов. В этом интервале обжатий происходит формирование оптимального комплекса механических и виброакустодемпфирующих характеристик.

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 4.14).



а) б)

Рисунок 4.14. – Микроструктура алюминиевых сплавов Al-Zn-Mg

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 4.21).

Таблица 4.21. – Влияние термообработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Степень деформации ε, %	Скорость затухания звука d3, дБ/мс		Коэффициент потерь	
	Сплав 2 (Закалка 400 °С)	Сплав 4 (2-ст. старение)	Сплав 2 (Закалка 400 °С)	Сплав 4 (2-ст. старение)
0	5,80	4,76	0,60	0,57
10	6,20	5,48	0,64	0,65
20	6,90	5,93	0,72	0,69
30	7,12	6,18	0,79	0,74

Закалка и старение, как видно из таблицы 4.21, заметно меняют виброакустодемпфирующие свойства сплавов при разных степенях деформации.

Влияют на эти свойства и различные виды обработки образцов (таблица 4.22).

Таблица 4.22. – Влияние различных видов обработки на виброакустодемпфирующие свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Вид обработки сплава	Скорость затухания звука d3, дБ/мс		Коэффициент потерь	
	Сплав 2	Сплав 4	Сплав 2	Сплав 4
Литое состояние	3,94	4,73	0,42	0,50
I прокатка	5,26	5,92	0,58	0,59
II прессование	5,94	6,32	0,64	0,62

Из анализа таблицы видно, что после обработки виброакустодемпфирующие свойства сплавов выше, чем в литом состоянии.

4.3. Исследование виброакустодемпфирующих свойств композиционных материалов на основе деформируемых алюминиевых сплавов

Исследования 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.

При кристаллизации в мягкой алюминиевой матрице выделяются избыточные вторичные фазы, активно измельчающие зерно. Последующая пластическая деформация и термообработка закрепляют устойчивую мелкозернистую структуру. Именно она и обеспечивает заметный рост виброгасящей способности.

Поэтому деформируемые алюминиевые сплавы использовали в многослойных композиционных материалах; ранее такие композиции показали высокие акустодемпфирующие и механические свойства в условиях сверхпластичности [55]. В настоящей работе исследованы многослойные композиты из стали и деформируемых алюминиевых сплавов в разных сочетаниях в обычных условиях. Их основные характеристики приведены в таблице 3.3.

Виброгасящие свойства многослойных композитов из слоёв деформируемого сплава Al–Zn–Mg и низкоуглеродистой стали 08пс исследовали по методике раздела 2.3.

Результаты исследования вибро- и звукопоглощающих свойств многослойных композитных материалов на основе деформируемых алюминиевых сплавов представлены на рисунке 4.15 и в таблице 4.23. Для исследуемых композитных материалов были выбраны следующие виброакустические параметры: уровень звукового давления, уровень звука, коэффициент затухания звука и коэффициент потерь в образце материала.

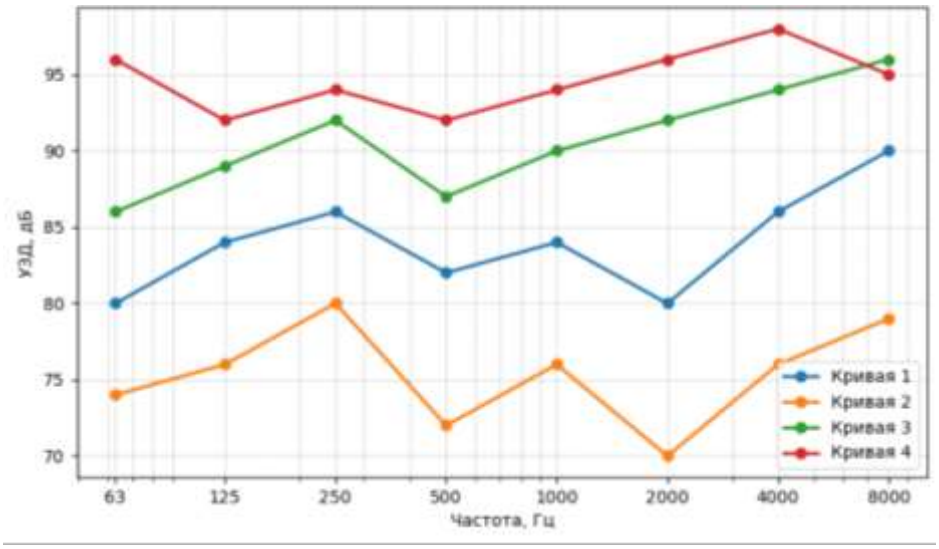


Рисунок 4.15. – Акустические свойства многослойных композитных материалов

Многослойные композиты на основе деформируемых алюминиевых сплавов обеспечивают более низкие уровни звукового давления, чем базовые сплавы, на всех исследованных частотах (рисунок 4.15). Минимумы приходятся на 500 и 2000 Гц, где материалы снижают виброакустические факторы наиболее эффективно. Свойства композиционных материалов приведены в таблице 4.23.

Таблица 4.23. – Виброакустодемпфирующие и механические свойства исследуемых многослойных композиционных материалов

Характеристика	Параметр	Композит 1	Композит 2	Композит 3	Композит 4
Механические свойства	σ, МПа	675	595	385	550
	δ, %	5,8	6,2	3,6	5,6
Виброакусто-демпфирующие свойства	d_3, дБ/мс	6,0	6,8	4,24	4,76
	Коэффициент потерь	0,62	0,80	0,48	0,56

Высокие виброакустодемпфирующие и механические свойства многослойных композитов (таблица 4.23) 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» [208].

Изменения виброакустодемпфирующих и механических свойств (рисунок 4.15, таблица 4.23) 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 приведены на рисунках 4.16–4.18.

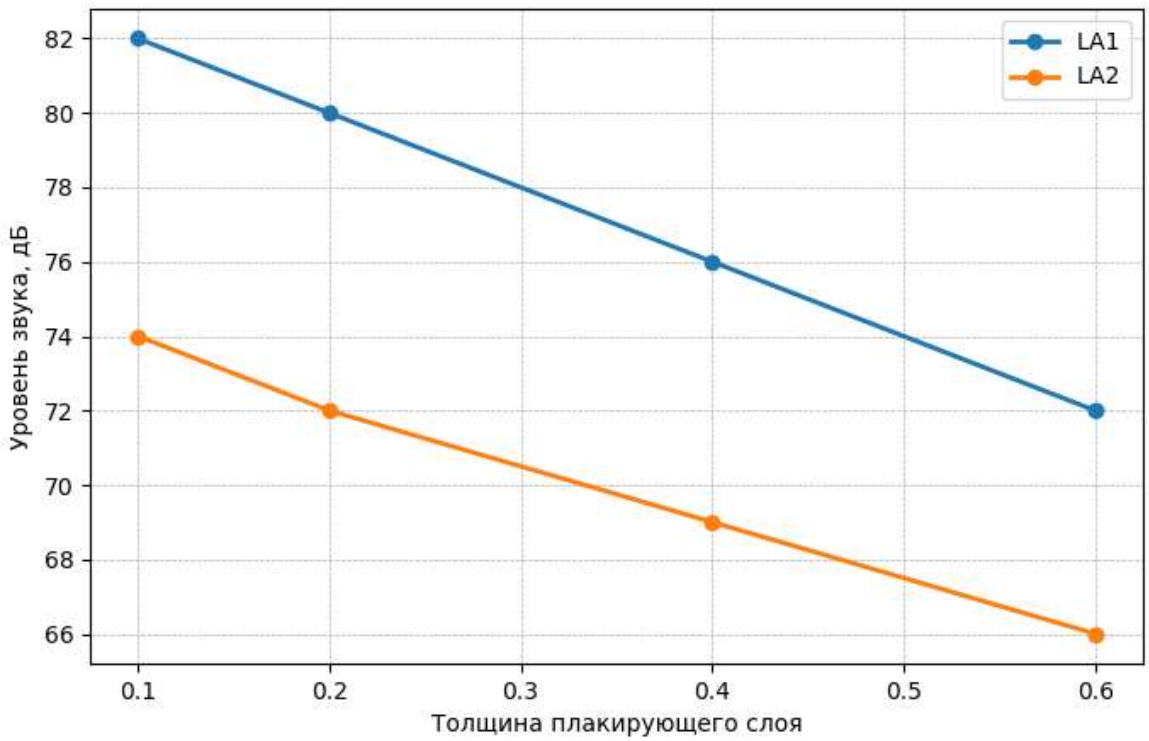


Рисунок 4.16. – Зависимость уровни звука от толщины плакирующего слоя

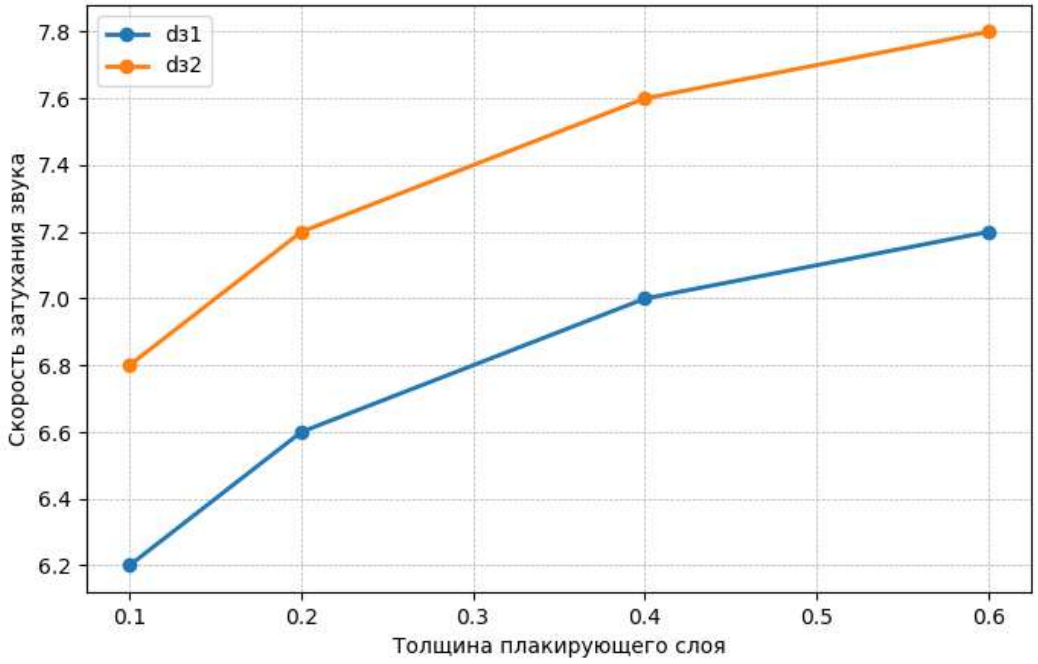


Рисунок 4.17. – Зависимость скорости затухания звука от изменения толщины плакирующего слоя

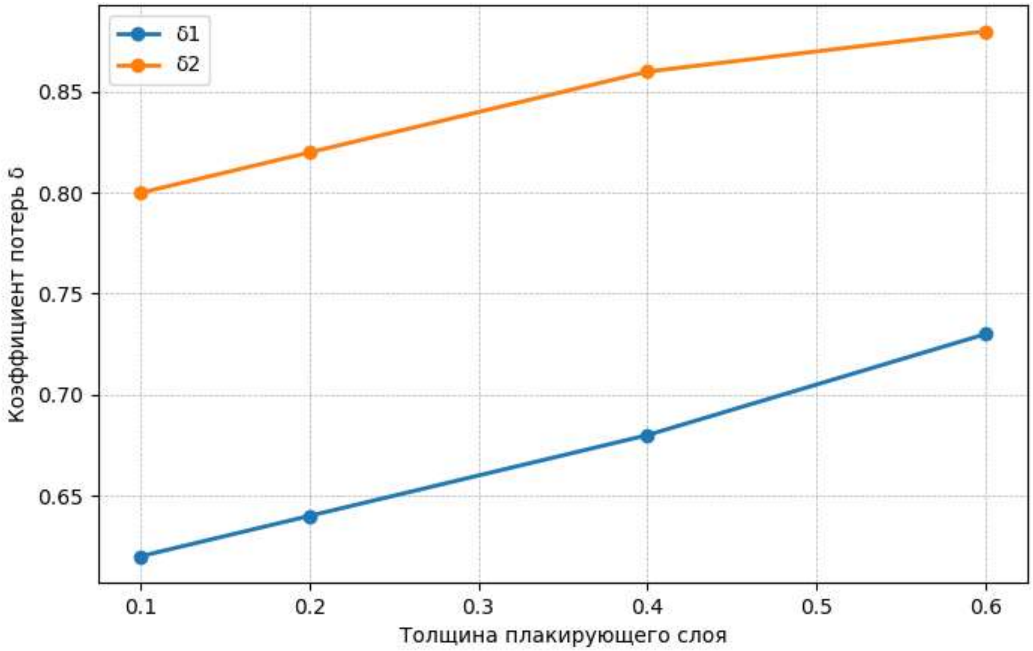


Рисунок 4.18. – Зависимость коэффициента потерь от изменения толщины плакирующего слоя

С увеличением толщины плакирующего слоя из деформируемого алюминиевого сплава виброакустодемпфирующие свойства композитов растут (рисунки 4.16–4.18). Скорее всего, это связано с особенностями микроструктуры плакирующего слоя (рисунок 4.19).

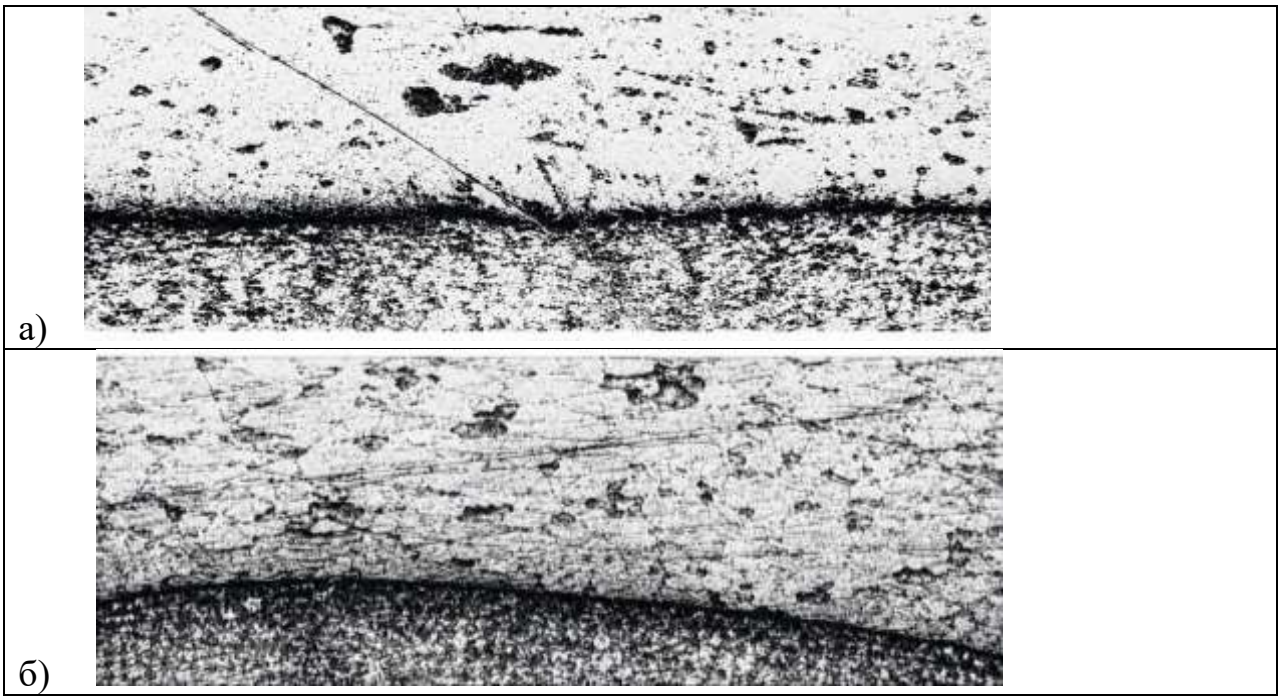


Рисунок 4.19. Микроструктура композиционных материалов

Как отмечалось выше, «…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» [208]. Отсюда можно предположить, что именно рост доли деформируемого алюминиевого сплава при утолщении плакирующего слоя и улучшает виброакустодемпфирующие способности композиционных материалов.

Выводы к четвертый главе

1. Виброакустодемпфирующие свойства материалов разных металлических систем, предназначенных для снижения виброакустических факторов на производстве, определяются в основном составом и содержанием модифицирующих и легирующих компонентов, а также видами обработки и режимами термообработки.

2. Анализ экспериментальных данных показал преимущество многокомпонентных сплавов системы Al–Si–(Sb, Ba, Sr) по вибродемпфирующим и механическим свойствам над стандартными силуминами марок АК9 и АК12.

3. Установлен механизм влияния модифицирования сурьмой, стронцием и барием, а также физико-химической обработки расплава на акустические параметры сплавов: фазовые составляющие диспергируются, кинетика фазовых превращений меняется.

4. Деформируемые алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg демонстрируют высокий уровень виброакустических характеристик. Их свойства определяющим образом зависят от соотношения концентраций цинка и магния, количества добавок редкоземельных металлов и параметров технологической обработки.

5. На основе анализа межкомпонентного взаимодействия в сплавах Al–Zn–Mg–РЗМ установлены оптимальные пределы легирования и режимы обработки. Их соблюдение обеспечивает существенный рост виброакустодемпфирующей способности материала при сохранении комплекса технологических свойств.

6. Применение деформируемых сплавов системы Al–Zn–Mg в составе многослойных композитов обеспечивает улучшение их диссипативной способности. Виброакустодемпфирующие свойства композитов определяются внутренним рассеянием энергии в слоях и на границах раздела за счет формирования твердофазных соединений в зоне контакта.

ГЛАВА 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАБОЧИХ ОТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТАДЖИКИСТАНА

5.1. Действующая система управления охраной труда и ее применимость к промышленным предприятиям

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.

В международных стандартах [270, 285] СУОТ построена на цикле Деминга «Планирование – Выполнение – Проверка – Действие» (PDCA), показанном на рисунке 5.1.

Цикл не заканчивается: пройдя его, предприятие начинает снова, каждый раз чуть улучшая систему. Сперва находят и оценивают риски, потом выполняют намеченное, затем меряют и наблюдают, а по итогам проверки решают, что поправить.



Рисунок 5.1. – Концепция цикла «Планирование – Действие – Контроль – Доработка» (PDCA)

Модель СУОТ по ISO 45001:2018 [285] и ILO–OSH 2001 [286] изображена на рисунке 5.2.

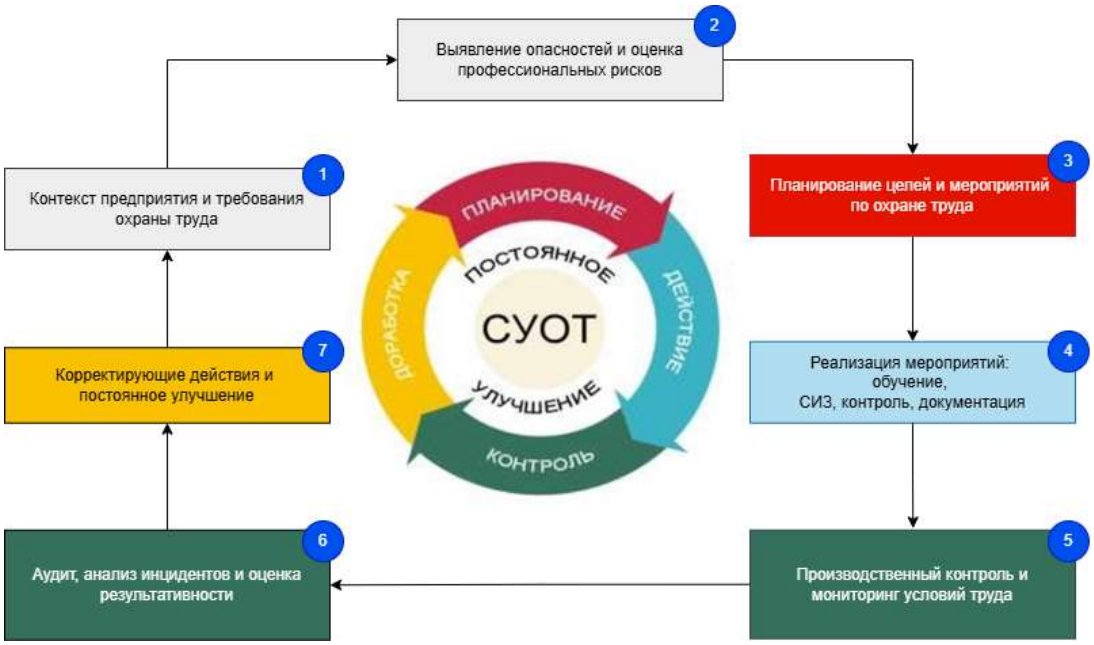


Рисунок 5.2. – Структурная модель системы управления охраной труда в соответствии с международными стандартами

На рисунке 5.2 СУОТ 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.

Пройдём по этапам.

1. Первый этап – анализ производства: оборудования, численности персонала, технологических процессов, опасных и вредных факторов, требований законодательства.

2. На втором этапе от формального выполнения требований переходят к управлению рисками: выявляют источники опасности (оборудование, среду, операции, режимы, человеческий фактор, организацию работ), оценивают вероятность и тяжесть последствий и определяют первоочередные риски.

3. На третьем этапе по результатам оценки рисков ставят цели и приоритеты, разрабатывают программы профилактических и корректирующих мероприятий с ответственными, сроками и ресурсами. В них могут входить модернизация оборудования, средства защиты, обучение, улучшение производственной среды, автоматический контроль опасных факторов, пересмотр внутренних документов.

4. Четвёртый этап – выполнение: обучение, СИЗ, контроль, документы. Люди учатся работать безопасно, СИЗ ослабляют воздействие, контролёры следят за порядком на рабочих местах, а в документах остаётся след каждого инструктажа, проверки, оценки риска, расследования и выполненного предписания. Здесь СУОТ впервые работает на уровне цеха и рабочего места.

5. Пятый этап – производственный контроль и мониторинг: регулярно смотрят за средой, оборудованием, рабочими местами и поведением людей, фиксируют отклонения и меряют фактические уровни вредных факторов – шума, вибрации, микроклимата, освещённости, пыли, газов, электромагнитных полей. Шум и вибрацию на заводах надо отслеживать постоянно: они действуют годами и приводят к профессиональным болезням. По результатам этого этапа видно, работают ли принятые меры.

6. Шестой этап – аудит, разбор происшествий и оценка результата. Аудит сравнивает то, что делается, с требованиями, регламентами и программами. Разбор несчастных случаев, микротравм, нарушений и опасных ситуаций показывает слабые места. В итоге отвечают на вопрос: стало ли меньше риска, нарушений, лучше ли условия? Обязательно выясняют причины происшествий – технические, организационные, поведенческие.

7. Седьмой этап – исправление и улучшение; он закрывает один круг и открывает следующий. Найдены недостатки – значит, переписывают инструкции, доучивают людей, усиливают контроль, ремонтируют или меняют оборудование, улучшают защиту, меняют режимы, уточняют оценку рисков. Так система живёт и меняется вместе с производством.

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

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 [271, 280].

Правовую основу охраны труда в Республике Таджикистан образуют Трудовой кодекс, Закон «Об охране труда», законодательство о санитарно-эпидемиологической безопасности и нормы промышленной безопасности.

В «Трудовом кодексе Республики Таджикистан» есть отдельная глава о правах и обязанностях сторон в области охраны труда [28]. Она закрепляет право работников на безопасные условия труда и обязанность работодателя их обеспечить.

Закон Республики Таджикистан «Об охране труда» задаёт правовые основы регулирования в этой сфере и возлагает персональную ответственность за безопасность на производстве на работодателя.

Действующая СУОТ на предприятиях включает ряд взаимосвязанных элементов:

– организацию службы охраны труда и распределение функциональных обязанностей;

– проведение инструктажей и специального обучения персонала;

– специальную оценку условий труда и оперативный контроль; обеспечение работников средствами индивидуальной и коллективной защиты;

– организацию медицинских осмотров и ведение отчетной документации;

– расследование несчастных случаев и разработку профилактических мероприятий.

Такая 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 [295]. Охрана труда на промышленных предприятиях должна поэтому тесно увязываться с технической эксплуатацией и диагностикой оборудования и управлением производственными рисками.

Принципиальное значение имеет и санитарно-гигиеническая составляющая. Законодательство Республики Таджикистан о санитарно-эпидемиологическом благополучии требует предупреждать вредное воздействие факторов среды на здоровье человека и устанавливает правовые и организационные основы санитарной безопасности населения [296]. Применительно к производству это значит, что работодатель обязан учитывать и травмоопасные факторы, и вредные физические факторы длительного действия: шум, вибрацию, микроклимат, освещённость, электромагнитные поля и другие.

Для темы исследования особенно важно 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 [296, 297]. Поэтому защита от виброакустических факторов входит и в санитарно-гигиенический контроль, и в общую систему управления охраной труда.

Применимость 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.

Однако в отношении виброакустических факторов действующая СУОТ нуждается в доработке. Контроль шума и вибрации на практике часто эпизодичен: проверки, аттестация рабочих мест, санитарно-гигиенические измерения, реакция на жалобы. Такой подход фиксирует наличие вредного фактора, но не всегда позволяет управлять причиной его появления. Особенно это касается оборудования, где шум и вибрацию порождают виброударные процессы при соударении деталей машин и механизмов.

Кроме того, защита нередко ограничивается организационными решениями и СИЗ. Между тем против виброакустических факторов эффективнее технические меры, снижающие шум и вибрацию в источнике или на пути распространения: виброизоляция, демпфирование, акустическое экранирование, шумозащитные кожухи, техническая диагностика, балансировка вращающихся узлов, ремонт опор и креплений, применение виброакустодемпфирующих материалов в конструкции оборудования [208, 269].

Действующая СУОТ, таким образом, пригодна для промышленных предприятий Таджикистана как организационно-правовая основа безопасности труда. Но в условиях современного производства её необходимо дополнить риск-ориентированным механизмом оценки и снижения виброакустических факторов. Он должен включать «…выявление источников шума и вибрации, инструментальное измерение, расчет интегрального виброакустического риска,

ранжирование рабочих мест, выбор инженерных средств защиты, внедрение мероприятий в СУОТ и повторный контроль эффективности» [31].

Дальнейшее развитие СУОТ предполагает переход от преимущественно реактивного контроля к превентивному управлению профессиональными рисками. Реализовать его предлагается через модель оценки виброакустического риска и обоснование применения виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов, защищающих рабочие места от шума и вибрации.

Для промышленности Таджикистана такая модель актуальна, поскольку значительная часть процессов связана с работой машин, механизмов, производственных линий, транспорта, компрессоров, насосов, дробилок, вентиляции, прокатных станов, пневмоинструмента. Вредные факторы здесь, как уже отмечалось, возникают не случайно. Их порождают конкретные технологические процессы, техническое состояние оборудования, режим эксплуатации, износ деталей и организация труда [30].

Ключевую роль при таком переходе играет система определения профессиональных рисков. Она фиксирует наличие вредного фактора и оценивает его значимость для конкретного рабочего места. Риск складывается из нескольких составляющих: уровня воздействия, продолжительности контакта с источником, технического состояния оборудования, эффективности коллективных и индивидуальных средств защиты, вероятности ухудшения условий труда при смене режима или износе оборудования.

Поэтому в настоящей работе основное внимание уделено виброакустическим рискам. Шум и вибрация относятся к вредным физическим факторам длительного и накопительного действия. В отличие от единичного травмоопасного события, их влияние может проявиться не сразу, но при систематическом воздействии ведёт к утомлению, снижению концентрации и работоспособности, росту вероятности профессиональных нарушений здоровья. Периодических измерений для таких

факторов недостаточно, необходимо постоянное риск-ориентированное управление.

Виброакустические факторы тесно связаны с техническим состоянием и конструкцией машин и механизмов. Самые высокие уровни шума и вибрации создают виброударные процессы, то есть соударения деталей, рабочих органов, заготовок и оснастки. Они характерны для дробления, сортировки, выбивки, ковки, прессования, штамповки, прокатки, металлообработки и других операций. Выдача СИЗ или периодический контроль не позволяют управлять причиной такого риска.

Поэтому в СУОТ предлагается ввести специализированный блок определения и оценки виброакустического риска. В его задачи входят выявление источников шума и вибрации, измерение фактических уровней воздействия, оценка продолжительности контакта работника с источником, учёт технического состояния оборудования и эффективности средств защиты, расчёт интегрального показателя риска. Это позволяет перейти от общей характеристики условий труда к количественному ранжированию рабочих мест по степени опасности.

Совершенствовать СУОТ на предприятиях Таджикистана, по нашему мнению, нужно сразу в трёх направлениях: гигиеническая оценка шума и вибрации, управление по рискам и инженерные решения, снижающие виброакустическую нагрузку.

Предлагаемая модель (рисунок 5.3) описывает последовательность управленческих и технических действий – от выявления источников шума и вибрации до проверки эффективности принятых мер, после которой цикл повторяется.

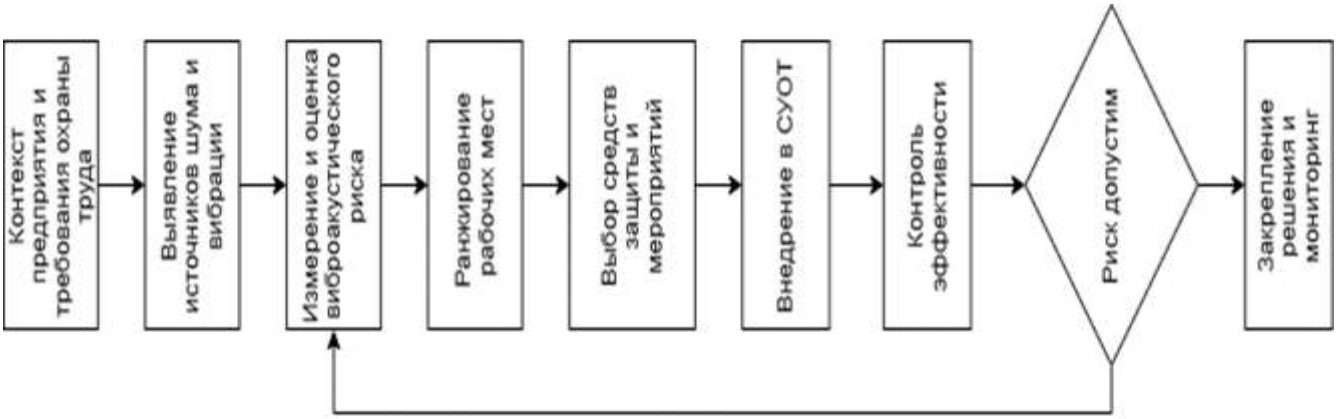


Рисунок 5.3. – Модель совершенствования СУОТ при управлении виброакустическими рисками

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. Развитие методов оценки профессионального риска на промышленных предприятиях

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.

Методологическую основу оценки профессионального риска дают 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 здоровья.

Система строится на цикле постоянного улучшения PDCA: планирование, выполнение, проверка, действия по улучшению [270].

ГОСТ Р ИСО 31000–2019 описывает управление риском как непрерывный процесс: выявить, проанализировать, оценить, обработать, а затем наблюдать, пересматривать, документировать и отчитываться. Стандарт годится для любых рисков, в том числе профессиональных на заводских рабочих местах [271].

Для охраны труда основным документом является ГОСТ Р 12.0.010–2009, который устанавливает правила и методы оценки рисков для жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

Оценка риска в нём – первый шаг управления риском [273]: найти опасности, оценить возможный ущерб, вероятность и итоговый показатель. Оценка виброакустического риска – часть СУОТ, а не разовый замер. По её результатам ранжируют рабочие места, выбирают защиту, планируют модернизацию и проверяют, что из сделанного сработало.

Начинают с гигиенической оценки – сравнивают измеренные шум и вибрацию с нормой. Так становится ясно, соответствует ли рабочее место требованиям и где нужны меры.

Шум оценивают по ГОСТ 12.1.003–2014 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности». Стандарт рассматривает шум с точки зрения вредного влияния на здоровье работника, прежде всего на орган слуха, и устанавливает общие требования к оценке воздействия шума в нормальных условиях рабочего процесса [274].

Вибрацию оценивают по ГОСТ 12.1.012–2004 «Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования», задающему общие требования вибробезопасности в промышленности, на транспорте, в строительстве, горнодобывающей отрасли и других сферах, где вибрация может негативно воздействовать на человека [275].

Риск от виброакустических и других опасных и вредных факторов оценивают разными методами. Выбор зависит от цели оценки, доступности исходных данных, характера производства, требуемой детализации и тех управленческих решений, которые предстоит принять.

Метод оценки должен учитывать факт превышения шума или вибрации, продолжительность воздействия, состояние оборудования, обеспеченность работников средствами защиты, возможность последующего управления риском. Для промышленных предприятий Таджикистана это актуально, поскольку значительная часть оборудования эксплуатируется долго, а автоматизированный мониторинг условий труда развит слабо.

Методы оценки профессионального риска условно делят на нормативно-гигиенические, экспертные, балльные, индексные, вероятностные, технические и системные [279, 280].

Нормативно-гигиенический метод сравнивает фактические значения вредного фактора с допустимыми. Для производственного шума используется зависимость:

$$\boldsymbol{\Delta L = L_f - L_{\text{доп}}}, \qquad (5.1)$$

где L_f −фактический уровень шума, дБА;

$L_{\text{доп}}$ – допустимый уровень шума, дБА.

Для вибрации применим коэффициент превышения вибрационного параметра:

$$\boldsymbol{K = \frac{X_f}{X_{\text{доп}}}}, \qquad (5.2)$$

где X_f–фактическое значение вибрационного параметра;

$X_{\text{доп}}$ – допустимое значение вибрационного параметра.

Метод напрямую связан с нормативными требованиями и позволяет установить, соответствует ли рабочее место требованиям безопасности. Однако управленческие и организационные параметры (продолжительность воздействия, техническое состояние оборудования, число работников в зоне воздействия, качество средств защиты) он учитывает лишь частично.

Матричный метод определяет риск как сочетание вероятности и тяжести последствий:

$$\boldsymbol{R = P \times S,} \qquad (5.3)$$

где P – вероятность возникновения опасного события или вредного воздействия; S – тяжесть последствий.

Метод прост и удобен для первичной оценки, но для виброакустических факторов недостаточен. Шум и вибрация действуют на работника длительно, в отличие от одномоментного опасного события. Поэтому помимо вероятности и тяжести необходимо учитывать экспозицию, то есть продолжительность и частоту воздействия.

Метод Файна–Кинни рассчитывает риск как произведение вероятности, экспозиции и тяжести последствий [281]:

$$\boldsymbol{R = P \times E \times C,} \qquad (5.4)$$

где P – вероятность;

E – экспозиция, то есть частота или продолжительность воздействия;

C – последствия тяжести.

Достоинством метода является учёт экспозиции, особенно важной при оценке шума и вибрации. Метод Файна–Кинни считается практически применимым инструментом оценки профессиональных рисков в корпоративных системах

управления охраной труда [281] и обладает эвристической ценностью для развития риск-ориентированной оценки профессиональных опасностей [280].

Есть у него и ограничения. Значения вероятности, экспозиции и последствий во многих случаях задаются экспертно. Кроме того, метод не выделяет параметров, существенных именно для виброакустических факторов: технического состояния оборудования, наличия виброизоляции, эффективности шумозащитных кожухов, фактического применения СИЗ. Поэтому он пригоден как сравнительный, но не как основной расчётный инструмент.

Балльный метод присваивает каждому фактору балл. Уровни шума и вибрации, продолжительность воздействия, состояние оборудования, обеспеченность средствами защиты можно оценивать, например, по шкале от 1 до 5.

$$\boldsymbol{R_b = B_n + B_v + B_t + B_e + B_s,} \qquad (5.5)$$

где $\boldsymbol{B_n}$ – значение балла по шуму;

$\boldsymbol{B_v}$ – значение балла по вибрации;

$\boldsymbol{B_t}$– значение балла по времени воздействия;

$\boldsymbol{B_e}$ – значение балла по состоянию оборудования;

$\boldsymbol{B_s}$ – значение балла по средствам защиты.

Метод удобен для экспертной комиссии, но субъективен. Для предварительной классификации рабочих мест он годится; для окончательных выводов нужна более строгая и воспроизводимая модель.

Индексный метод приводит разнородные факторы к единой безразмерной шкале. Для виброакустических факторов это необходимо, поскольку шум измеряется в дБА, вибрация в м/с², время воздействия в часах, а состояние оборудования и обеспеченность СИЗ выражаются качественно.

Общий индекс может быть представлен в виде:

$$\boldsymbol{I_r = \frac{I_n + I_v + I_t + I_e + I_s}{5}}, \quad (5.6)$$

где $\boldsymbol{I_n}$ – индекс воздействия шума;

$\boldsymbol{I_v}$ – индекс воздействия вибрации;

$\boldsymbol{I_t}$ – индекс продолжительности воздействия;

$\boldsymbol{I_e}$ – индекс технического состояния оборудования;

I_s – индекс защищенности работника.

Недостатком простого индексного метода является одинаковый вес всех факторов. В реальных условиях это не всегда оправдано. Для пневмоинструмента определяющей может быть локальная вибрация, а для вентиляционной установки шум.

Метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) расшифровывается как анализ видов и последствий отказов [282]. Он полезен для выявления технических причин роста шума и вибрации: износ подшипников, дисбаланс ротора, нарушение центровки, ослабление креплений, дефекты привода повышают виброакустическую нагрузку на работника.

Показатель приоритетности риска в FMEA обычно рассчитывается так:

$$\boldsymbol{RPN = S \times O \times D}, \quad (5.7)$$

где S – тяжесть последствий;

O – вероятность возникновения отказа;

D – возможность обнаружения отказа.

FMEA целесообразен как дополнительный метод технического анализа оборудования, но не как самостоятельный метод оценки условий труда.

HAZOP (Hazard and Operability Study) – исследование опасностей и работоспособности – разбирает, что будет, если процесс отклонится от нормы [283]. Он хорош для сложных участков: дробильно-сортировочных линий, компрессорных, вентиляции, металлургических печей, прокатных станов.

Причины отклонений HAZOP выявляет подробно, но требует много времени и группы экспертов. Поэтому в нашей работе мы предлагаем применять его только на самых опасных участках.

Bow–Tie («галстук-бабочка») – графический метод [284]: слева причины, в центре событие, справа последствия, между ними защитные барьеры. Для нашей задачи центральное событие – «превышение допустимого уровня шума и вибрации».

Картинка получается наглядной и помогает обосновать барьеры, но цифры риска этот метод сам не даёт.

ISO 31000 задаёт общую логику: выявление, анализ, оценка, обработка риска, мониторинг, пересмотр [279]. 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 [285] 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 [286]. 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 существующих методов оценки

Методы	Учет факторов	Преимущества	Недостаток	Применимость
Нормативно–гигиенический	Фактическое превышение шума и вибрации	Прямая связь с нормативами	Не учитывает комплексно 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

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:

$$\boldsymbol{R_{va} = w_1 K_n + w_2 K_v + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s,} \qquad (5.8)$$

где:

$\boldsymbol{R_{va}}$ – интегральный показатель виброакустического риска;

$\boldsymbol{K_n}$ – коэффициент воздействия шума;

$\boldsymbol{K_v}$ – коэффициент воздействия вибрации;

$\boldsymbol{K_t}$ – коэффициент продолжительности воздействия;

$\boldsymbol{K_e}$ – коэффициент технического состояния оборудования;

$\boldsymbol{K_s}$ – коэффициент недостаточности средств защиты;

$\boldsymbol{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5}$ – весовые коэффициенты значимости факторов.

Для базового варианта оценки можно принять следующие весовые коэффициенты (таблица 5.2).

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.

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

Факторы	Обозначение	Весовой коэффициент
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 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 риска

Значение индекса $\boldsymbol{R_{va}}$	Уровень риска	Управленческое решение
0–0,30	Низкий	Плановый контроль, поддержание существующих мер
0,31–0,60	Умеренный	Корректировка режима труда, проверка СИЗ, технический осмотр оборудования
0,61–0,80	Высокий	Разработка инженерных мер, ограничение времени воздействия, внеплановые измерения
0,81–1,00	Критический	Немедленное снижения воздействия, временное ограничение работ, модернизация оборудования

Нормирование коэффициентов интегральной модели. Для расчёта по формуле 5.8 все показатели приводятся к шкале от 0 до 1.

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

$$\boldsymbol{K_n} = \frac{\boldsymbol{L_f - L_{доп}}}{\boldsymbol{L_{max} - L_{доп}}}, \qquad (5.9)$$

где L_f −фактический уровень шума;

$L_{доп}$ −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.

Коэффициент вибрационного воздействия K_v, :

$$\boldsymbol{K_v} = \frac{\boldsymbol{X_f - X_{доп}}}{\boldsymbol{X_{max} - X_{доп}}}, \qquad (5.10)$$

где X_f − фактическое значение вибрационного параметра;

$X_{доп}$ −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:

$$\boldsymbol{K_t = \frac{T_f}{T_s}}, \qquad (5.11)$$

где T_f −фактическое время воздействия;

T_s – продолжительность рабочей смены.

Например, если вибрация действует 4 часа из восьмичасовой смены, то:

$$\boldsymbol{K_t = \frac{4}{8} = 0,50}.$$

Коэффициент технического состояния оборудования $\boldsymbol{K_e}$. . Его ставят эксперты или берут по результатам технической диагностики (таблица 5.4).

Таблица 5.4. – Значение коэффициента технического состояния оборудования

№	Коэффициента технического состояние оборудования	$\boldsymbol{K_e}$
1.	Исправное, новое или модернизированное	0,20
2.	Удовлетворительное	0,40
3.	Средний износ	0,60
4.	Выраженный износ	0,80
5.	Аварийное или предаварийное состояние	1,00

Коэффициент недостаточности средств защиты $\boldsymbol{K_s}$. Данный коэффициент отражает, насколько существующие средства защиты недостаточны для снижения риска (таблица 5.5).

Таблица 5.5. – Значение коэффициента недостаточности средств защиты

№	Коэффициента недостаточности состояние защиты	K_s
1.	Коллективная защита и СИЗ эффективны	0,10
2.	Защита имеется, но требует контроля	0,30
3.	Защита частичная	0,50
4.	Защита недостаточная	0,70
5.	Защита отсутствует	1,00

Для практической интерпретации интегрального показателя предлагается шкала, приведённая в таблице 5.6.

Таблица 5.6. – Шкала для интерпретации показателя виброакустического риска

Значение $\boldsymbol{R_{va}}$	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

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.

Ниже приведены примеры расчёта виброакустического риска для разных производств.

Металлообрабатывающее производство: токарный станок

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	88 дБА
Уровень вибрации	0,65 м/с²
Время воздействия	6 часов
Техническое состояние оборудования	удовлетворительное
Обеспеченность СИЗ	частичная

Нормированные коэффициенты:

$$\boldsymbol{K_n = 0,32}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,31}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,75}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,50}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,30}$$

Расчет R_{va} :

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,32 + 0,30 \cdot 0,31 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 0,50 + 0,10 \cdot 0,30}$$

$$R_{va} = 0{,}096 + 0{,}093 + 0{,}1125 + 0{,}075 + 0{,}030 = 0{,}4065$$

$$R_{va} \approx 0{,}407$$

Полученное значение соответствует умеренному риску. Для этого рабочего места достаточно организационных мер, контроля применения СИЗ, регулярного технического обслуживания станка и периодического инструментального контроля.

2. Шлифовальный станок

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	94 дБА
Уровень вибрации	0,85 м/с²
Время воздействия	7 часов
Техническое состояние оборудования	средний износ
Обеспеченность СИЗ	недостаточная

Значение коэффициентов:

$$\boldsymbol{K_n = 0{,}56}, \quad \boldsymbol{K_v = 0{,}56}, \quad \boldsymbol{K_t = 0{,}88}, \quad \boldsymbol{K_e = 0{,}60}, \quad \boldsymbol{K_s = 0{,}40}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0{,}30 \cdot 0{,}56 + 0{,}30 \cdot 0{,}56 + 0{,}15 \cdot 0{,}88 + 0{,}15 \cdot 0{,}60 + 0{,}10 \cdot 0{,}40}$$

$$R_{va} = 0{,}168 + 0{,}168 + 0{,}132 + 0{,}090 + 0{,}040 = 0{,}598$$

$$R_{va} \approx 0{,}598$$

Риск находится на верхней границе умеренного уровня и приближается к высокому. Рекомендуются локальный акустический экран, виброизолирующая подставка, балансировка вращающихся элементов и обязательное применение противошумных наушников.

3. Компрессорный участок: компрессорная установка

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	98 дБА
Уровень вибрации	0,75 м/с²
Время воздействия	6 часов
Техническое состояние оборудования	повышенный износ
Обеспеченность СИЗ	частично недостаточная

Значение коэффициентов:

$$\boldsymbol{K_n = 0,72}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,44}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,75}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,70}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,50}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,72 + 0,30 \cdot 0,44 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 0,70 + 0,10 \cdot 0,0}$$

$$R_{va} = 0{,}216 + 0{,}132 + 0{,}1125 + 0{,}105 + 0{,}050 = 0{,}6155$$

$$R_{va} \approx 0{,}616$$

Риск на компрессорном участке оценивается как высокий, поэтому необходимы инженерные меры: шумозащитный кожух, виброизоляция основания, диагностика подшипников, герметизация соединений, ограничение времени пребывания работников в зоне воздействия.

4. Дробильно–сортировочный участок: дробилка

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	102 дБА
Уровень вибрации	1,10 м/с²
Время воздействия	7 часов
Техническое состояние оборудования	выраженный износ
Обеспеченность СИЗ	недостаточная

Коэффициенты:

$$\boldsymbol{K_n = 0,88}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,88}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,88}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,80}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,50}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,88 + 0,30 \cdot 0,88 + 0,15 \cdot 0,88 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,10 \cdot 0,50}$$

$$R_{va} = 0{,}264 + 0{,}264 + 0{,}132 + 0{,}120 + 0{,}050 = 0{,}830$$

$$R_{va} \approx 0{,}830$$

Риск при работе дробилки критический. Требуются срочные инженерные мероприятия: капитальный ремонт или замена дробилки, виброизолирующее основание, шумозащитное укрытие, дистанционное управление, ограничение постоянного пребывания работников рядом с источником.

5. Энергетическое хозяйство: насосная или вентиляционная установка

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	90 дБА
Уровень вибрации	0,55 м/с²
Время воздействия	5 часов
Техническое состояние оборудования	удовлетворительное
Обеспеченность СИЗ	частичная

Значение коэффициентов:

$$\boldsymbol{K_n = 0,40}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,19}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,63}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,50}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,30}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,40 + 0,30 \cdot 0,19 + 0,15 \cdot 0,63 + 0,15 \cdot 0,50 + 0,10 \cdot 0,30}$$

$$R_{va} = 0{,}120 + 0{,}057 + 0{,}0945 + 0{,}075 + 0{,}030 = 0{,}3765$$

$$R_{va} \approx 0{,}377$$

Риск оценивается как умеренный, и достаточно плановой диагностики насоса или вентилятора, устранения дисбаланса, проверки креплений, установки виброопор и контроля шума при максимальной нагрузке.

6. Ремонтно–механический участок: пневматический инструмент

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	96 дБА
Уровень вибрации	1,20 м/с²
Время воздействия	4 часа
Техническое состояние оборудования	средний износ
Обеспеченность СИЗ	недостаточная

Коэффициенты:

$$\boldsymbol{K_n = 0,64}, \quad \boldsymbol{K_v = 1,00}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,50}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,60}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,60}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,64 + 0,30 \cdot 1,00 + 0,15 \cdot 0,50 + 0,15 \cdot 0,60 + 0,10 \cdot 0,60}$$

$$R_{va} = 0{,}192 + 0{,}300 + 0{,}075 + 0{,}090 + 0{,}060 = 0{,}717$$

$$R_{va} = 0{,}717$$

Риск оценивается как высокий. Время воздействия меньше полной смены, но высокий уровень локальной вибрации заметно повышает общий риск. Необходимы антивибрационные перчатки, замена изношенного инструмента, ограничение времени непрерывной работы, переход на менее виброопасные технологии.

7. Транспортный участок: погрузчик

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	86 дБА
Уровень вибрации	0,95 м/с²
Время воздействия	5 часов
Техническое состояние техники	удовлетворительное
Обеспеченность СИЗ	частичная

Значение коэффициентов:

$$\boldsymbol{K_n = 0,24}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,69}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,63}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,50}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,40}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,24 + 0,30 \cdot 0,69 + 0,15 \cdot 0,63 + 0,15 \cdot 0,50 + 0,10 \cdot 0,40}$$

$$R_{va} = 0{,}072 + 0{,}207 + 0{,}0945 + 0{,}075 + 0{,}040 = 0{,}4885$$

$$R_{va} \approx 0{,}489$$

Риск умеренный, но основной вклад в него вносит не шум, а общая вибрация. Необходимы обслуживание подвески и сиденья, амортизирующие сиденья, выравнивание покрытия производственных проездов и ограничение длительности непрерывного управления техникой.

8. Сварочно–сборочный участок: вентиляция и ручной инструмент

Исходные данные:

Показатель	Значение
Уровень шума	89 дБА
Уровень вибрации	0,50 м/с²
Время воздействия	6 часов
Техническое состояние оборудования	удовлетворительное
Обеспеченность СИЗ	частичная

Коэффициенты:

$$\boldsymbol{K_n = 0,36}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,13}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,75}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,40}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,30}$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,36 + 0,30 \cdot 0,13 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 0,40 + 0,10 \cdot 0,30}$$

$$R_{va} = 0{,}108 + 0{,}039 + 0{,}1125 + 0{,}060 + 0{,}030 = 0{,}3495$$

$$R_{va} \approx 0{,}350$$

Риск соответствует умеренному уровню. Достаточно усилить плановый контроль, обеспечить постоянное применение СИЗ, проверить вентиляционное оборудование и не допускать роста шума при износе подвижных элементов.

Данные расчетов обобщены в таблице 5.7.

Таблица 5.7. – Данные расчетов R_{va} для различных производств металлообработки

№	Производство / участок	Оборудование	K_n	K_v	K_t	K_e	K_s	R_{va}	Уровень риска
1	Металлообработка	Токарный станок	0,32	0,31	0,75	0,50	0,30	0,407	У
2	Металлообработка	Шлифовальный станок	0,56	0,56	0,88	0,60	0,40	0,598	У
3	Компрессорный участок	Компрессор	0,72	0,44	0,75	0,70	0,50	0,616	В
4	Дробильно–сортировочный участок	Дробилка	0,88	0,88	0,88	0,80	0,50	0,830	К
5	Энергетическое хозяйство	Насос / вентилятор	0,40	0,19	0,63	0,50	0,30	0,377	У
6	Ремонтно–механический участок	Пневмоинструмент	0,64	1,00	0,50	0,60	0,60	0,717	В
7	Транспортный участок	Погрузчик	0,24	0,69	0,63	0,50	0,40	0,489	У
8	Сварочно–сборочный участок	Вентиляция и ручной инструмент	0,36	0,13	0,75	0,40	0,30	0,350	У

Примечание: У–умеренный, В–высокий, К–критический

Краткий коментария к таблицу

2. Горнорудная и металлургическая производства

Применимость модели покажем на нескольких типичных рабочих местах этих производств.

Пример 1. Горнорудное производство: дробильная установка

Исходные коэффициенты:

$$\boldsymbol{K_n = 0,96}, \quad \boldsymbol{K_v = 0,92}, \quad \boldsymbol{K_t = 0,88}, \quad \boldsymbol{K_e = 0,80}, \quad \boldsymbol{K_s = 0,50}.$$

Расчет R_{va}:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,96 + 0,30 \cdot 0,92 + 0,15 \cdot 0,88 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,10 \cdot 0,50}$$

$$R_{va} = 0{,}288 + 0{,}276 + 0{,}132 + 0{,}120 + 0{,}050 = 0{,}866$$

Следовательно:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,866}$$

Полученное значение R_{va} соответствует критическому уровню риска. Для данного оборудования необходимо применять срочные инженерные мероприятия: шумозащитное укрытие, виброизоляцию основания, дистанционное управление, ремонт или замену изношенных узлов.

Пример 2. Горнорудное производство: вибрационный грохот

$$K_n = 0{,}68, \quad K_v = 1{,}00, \quad K_t = 0{,}75, \quad K_e = 0{,}60, \quad K_s = 0{,}40.$$

$$R_{va} = 0{,}30 \cdot 0{,}68 + 0{,}30 \cdot 1{,}00 + 0{,}15 \cdot 0{,}75 + 0{,}15 \cdot 0{,}60 + 0{,}10 \cdot 0{,}40$$

$$R_{va} = 0{,}204 + 0{,}300 + 0{,}1125 + 0{,}090 + 0{,}040 = 0{,}7465$$

$$R_{va} \approx 0{,}747$$

Риск оценивается как высокий. Основной вклад вносит вибрация, поэтому в первую очередь требуются виброопоры, демпфирующие элементы, контроль креплений и ограничение доступа в зону повышенной вибрации.

Пример 3. Металлургическое производство: выбивная решетка

$$K_n = 0{,}92, \quad K_v = 1{,}00, \quad K_t = 0{,}63, \quad K_e = 0{,}80, \quad K_s = 0{,}60.$$

$$R_{va} = 0{,}30 \cdot 0{,}92 + 0{,}30 \cdot 1{,}00 + 0{,}15 \cdot 0{,}63 + 0{,}15 \cdot 0{,}80 + 0{,}10 \cdot 0{,}60$$

$$R_{va} = 0{,}276 + 0{,}300 + 0{,}0945 + 0{,}120 + 0{,}060 = 0{,}8505$$

$$R_{va} \approx 0{,}851$$

Риск достигает критического уровня. Требуются изоляция зоны выбивки, амортизирующее основание, акустическое ограждение, дистанционное управление и ограничение времени пребывания работников в зоне воздействия.

Пример 4. Металлургическое производство: прокатный стан

$$K_n = 0{,}76, \quad K_v = 0{,}69, \quad K_t = 0{,}75, \quad K_e = 0{,}60, \quad K_s = 0{,}60.$$

$$R_{va} = 0{,}30 \cdot 0{,}76 + 0{,}30 \cdot 0{,}69 + 0{,}15 \cdot 0{,}75 + 0{,}15 \cdot 0{,}60 + 0{,}10 \cdot 0{,}60$$

$$R_{va} = 0{,}228 + 0{,}207 + 0{,}1125 + 0{,}090 + 0{,}060 = 0{,}6975$$

$$R_{va} \approx 0{,}698$$

Риск соответствует высокому уровню. Необходимы вибродиагностика приводов, балансировка вращающихся элементов, акустические экраны, обслуживание валков и противошумные СИЗ.

Результаты расчетов обобщены в таблице 5.8

Таблица 5.8. – Результаты расчетов $\boldsymbol{R_{va}}$ для оборудования горнорудного и металлургического производства

№	Производство	Обору–дование	K_n	K_v	K_t	K_e	K_s	R_a	Уровень риска
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: В–высокий, К–критический

Расчёты (таблица 5.8) 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. Развитие средств защиты от виброакустического воздействия

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 5.9. – Инженерно–технические меры защиты от виброакустических факторов

Источник риска	Средства защиты
Дробильные установки	Шумозащитные укрытия, виброизолирующие основания, дистанционное управление
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

коментария

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 5.10).

Таблица 5.10. – Организационные меры защиты от воздействия виброакустических факторов

Мероприятие	Содержание
Ротация работников	Чередование операций с высоким и низким уровнем воздействия
Ограничение времени 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

коментарии

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 5.3) может внедряться по алгоритму, приведённому в таблице 5.11.

Таблица 5.11. – 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 превращает оценку шума и вибрации из формальной процедуры в управленческий инструмент постоянного снижения профессионального риска.

5.6. Применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов в системе инженерных средств защиты

К перспективным направлениям снижения виброакустических факторов на рабочих местах относится применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов. Как инженерно-техническое средство защиты они ослабляют передачу вибрации, уменьшают структурный шум и гасят колебания, возникающие при работе промышленного оборудования.

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.

Почему именно алюминиевые сплавы? Они лёгкие, достаточно прочные, хорошо обрабатываются, не боятся коррозии и удобны в многослойных конструкциях. Защита из них не перегружает ни машину, ни здание, а вибрацию и звук гасит хорошо.

Особенно интересны многослойные пакеты «металл – демпфирующий слой – металл» или «алюминиевый сплав – вибропоглощающий слой – защитная облицовка». Алюминий держит и распределяет нагрузку, демпфирующий слой переводит часть энергии колебаний в тепло – отсюда и меньше вибрации и шума.

С его помощью инженерные характеристики материала – коэффициент потерь η_m и скорость затухания звука V_z – переводятся в изменение интегрального риска R_{va}.

Алгоритм оценки демпфирующих материалов в СУОТ состоит из десяти этапов и двух петель обратной связи (рисунок 5.4).

Сначала находят, где в процессе что-то обо что-то бьётся: дробление, сортировка, выбивка, прессование, ковка, штамповка, металлообработка. Выясняют, какие части оборудования шумят и вибрируют сильнее всего.

Затем меряют шум и вибрацию на рабочем месте – во время обычной работы, иначе цифры не отразят реального риска.

На третьем этапе считают исходный риск $\boldsymbol{R_{va}^{до}}$, – каким было рабочее место до установки материала. Учитывают шум, вибрацию, время контакта, состояние оборудования и нехватку средств защиты.

Четвёртый этап – разбор конструкции: какие детали передают удары и структурный шум? Обычно это корпуса, рамы, кожухи, опоры, удароприёмные панели, вставки, крепёж.

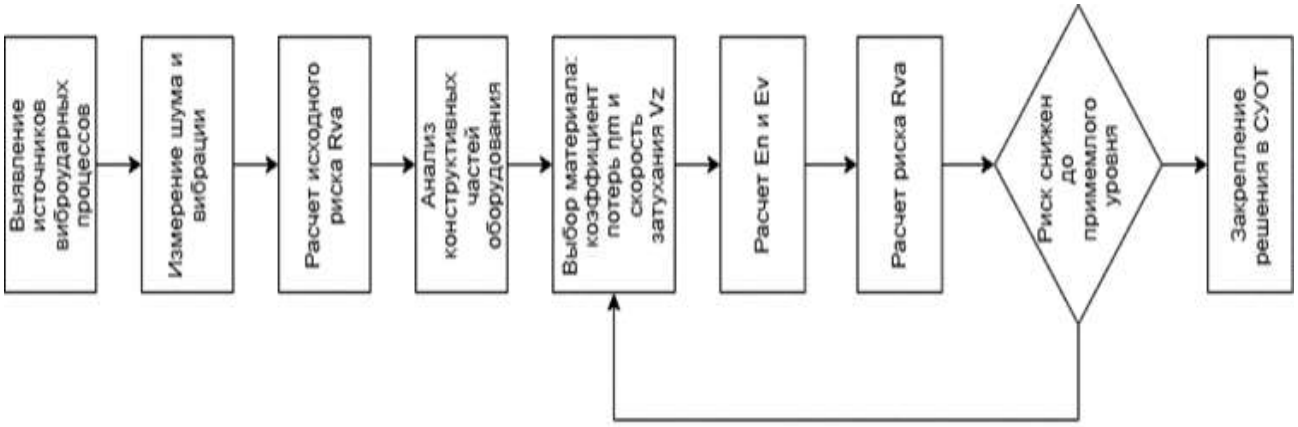


Рисунок 5.4. – Алгаритм оценки эффективности применения виброакустодемпфирующих материалов в системе управления охраной труда

Пятый этап – выбор материала. Смотрят на две его характеристики:

$\boldsymbol{\eta_m}$– коэффициент потерь материала;

$\boldsymbol{V_z}$– скорость затухания звука в материале.

Коэффициент потерь $\boldsymbol{\eta_m}$ говорит о том, какую долю энергии колебаний материал рассеивает: чем он больше, тем быстрее стихает вибрация после удара. Скорость затухания звука $\boldsymbol{V_z}$ в дБ/с показывает, как быстро замолкает деталь.

Шестой этап – расчёт показателей эффективности материала $\boldsymbol{E_v}$ и $\boldsymbol{E_n}$..

E_v – вибродемпфирующая эффективность материала, она выражается через коэффициент потерь:

$$\boldsymbol{E_v = \frac{\eta_m - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}}. \quad \text{.....(5.12)}$$

Так коэффициент потерь переводится в шкалу от 0 до 1, и материалы можно сравнивать.

$\boldsymbol{E_n}$ – акустическая эффективность, она выражается через скорость затухания звука:

$$\boldsymbol{E_n = \frac{V_z \cdot \tau}{\Delta L_{\text{целевое}}}}, \quad \text{.....(5.13)}$$

где V_z – скорость затухания звука, дБ/с;

τ – характерное время затухания акустического отклика, с;

$\Delta L_{\text{целевое}}$ – целевое снижение уровня шума, дБ.

Седьмой этап – расчёт остаточного риска $\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}}}$, для которого по видоизменённой формуле интегрального риска:

$$\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n^{\text{до}}(1 - \lambda_n E_n) + w_2 K_v^{\text{до}}(1 - \lambda_v E_v) + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s}. \quad (5.14)$$

Здесь E_n и E_v – насколько материал срезает шумовую и вибрационную части риска, а λ_n и λ_v – какая доля этого эффекта реально достигается в конструкции. Без последних не обойтись: результат зависит не только от материала, но и от того, как его поставили, какова площадь контакта, толщина, жёсткость узла и режим работы машины.

Получив $\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}}}$, задают вопрос: «Риск снижен до приемлемого уровня?»

Ответ «Да» – переходят к девятому этапу и закрепляют решение в СУОТ: конструкцию, материал и меры вносят в карты риска, инструкции, регламенты обслуживания, планы контроля, программы профилактики.

Десятый этап – периодический контроль. И после успеха нужно повторять замеры, следить за оборудованием, за износом материала и за тем, не ослаб ли эффект. Потом всё начинается сначала: управление риском – дело непрерывное.

Ответ «Нет» – значит, решение не сработало, и на восьмом этапе конструкцию и меры дорабатывают: делают демпфирующий слой толще, меняют крепление или материал, добавляют виброизоляцию, кожух, организационные меры или СИЗ. После этого снова выбирают материал и снова считают.

Алгоритм на рисунке 5.4 замкнут и следует принципу постоянного улучшения. Его суть – не просто записать уровень шума и вибрации, а посчитать, насколько материал снизил риск, через остаточный риск $R_{va}^{\text{после}}$.

Обычно защиту оценивают по принципу «есть / нет». Здесь же видно, насколько реально снизился риск, потому что в расчёт входят физические характеристики материала – коэффициент потерь $\boldsymbol{\eta_m}$ и скорость затухания звука $\boldsymbol{V_z}$.

Алгоритм работает на трёх уровнях. Механический – сколько энергии удара материал способен поглотить. Инженерный – какую деталь или узел из него сделать. Управленческий – насколько снизился риск и как это закрепить в системе охраны труда.

Практическая ценность алгоритма состоит в том, что специалисты по охране труда и инженерно-технические службы предприятий могут использовать его для выбора материалов, обоснования модернизации оборудования и оценки эффективности защитных мер.

Применение виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов в конструктивных элементах оборудования можно обосновать и с позиций классической механики. Во многих технологических операциях виброакустические факторы порождаются виброударными процессами,

то есть соударениями деталей машин, рабочих органов, заготовок, оснастки и механизмов. 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:

$$\boldsymbol{E}_{\text{уд}} = \boldsymbol{E}_{\text{п}} + \boldsymbol{E}_{\text{к}} + \boldsymbol{E}_{\text{р}} + \boldsymbol{E}_{\text{зв}}, \qquad (5.15)$$

где $E_{\text{уд}}$ – энергия удара;

$E_{\text{п}}$ – энергия, затраченная на полезный технологический процесс;

$E_{\text{к}}$ – энергия упругих колебаний конструкции;

$E_{\text{р}}$ –энергия, рассеиваемая материалом;

$E_{\text{зв}}$ – энергия, излучаемая в виде звуковых колебаний.

С точки зрения охраны труда наиболее нежелательными являются составляющие $\boldsymbol{E}_{\text{к}}$ и $\boldsymbol{E}_{\text{зв}}$, 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.

Если элементы конструкции выполнены из материала с низким демпфированием, после удара в системе долго идут свободные колебания. В простейшем случае процесс описывается уравнением затухающих колебаний [234]:

$$\boldsymbol{m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)}, \qquad (5.16)$$

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.

Затухающие колебания можно представить выражением:

$$\boldsymbol{x(t) = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_d t + \varphi)}, \qquad (5.17)$$

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 $\boldsymbol{\delta}$ 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:

$$\boldsymbol{\eta_m} = \frac{\boldsymbol{E}_{\text{р}}}{\boldsymbol{E}_{\text{н}}}, \qquad (5.18)$$

где η_m – коэффициент потерь материала;

$E_{\text{р}}$ – энергия, рассеиваемая за цикл колебаний;

$E_{\text{н}}$ – энергия, накопленная в материале при деформации.

Иначе говоря, коэффициент потерь показывает, какая часть механической энергии не возвращается обратно в виде упругих колебаний, а рассеивается внутри материала. Чем больше $\boldsymbol{\eta_m}$, 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:

$$\boldsymbol{J} = \int_{\boldsymbol{t_1}}^{\boldsymbol{t_2}} \boldsymbol{F}\,(\boldsymbol{t})\boldsymbol{dt}, \qquad (5.19)$$

где $J -$ импульс силы;

$F(t)$ –ударнаясила;

$t_1, t_2 -$ начало и конец контакта.

Чем жёстче контакт и ниже демпфирование материала, тем резче импульс силы и выше амплитуда колебаний. Материал с повышенным демпфированием рассеивает часть энергии удара, в результате чего снижается звукоизлучение при контакте и ослабевает колебательный отклик конструкции.

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:

$$\boldsymbol{W}_{\text{зв}} \sim \boldsymbol{v^2}, \qquad (5.20)$$

где $W_{зв}$ −звуковая мощность, излучаемая поверхностью;

v – колебательная скорость поверхности.

Колебательная скорость связана с амплитудой вибрации, поэтому снижение вибрации элементов конструкции ведёт к снижению излучаемого шума [70]. Виброакустодемпфирующий материал влияет сразу на две составляющие риска:

$\boldsymbol{K_v}$– вибрационную составляющую;

$\boldsymbol{K_n}$– шумовую составляющую.

Материал снижает механическую вибрацию и связанный с ней структурный шум.

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:

$$\boldsymbol{\Delta L_m = V_z \tau}, \qquad (5.21)$$

где, ΔL_m −снижение уровня звука, дБ;

V_z − скорость затухания звука в материале, дБ/с;

τ – характерное время затухания, с.

Если после удара звук затухает быстрее, сокращается и 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:

$$\boldsymbol{K_v^{\text{после}} = K_v^{\text{до}}(1 - \lambda_v E_v)}, \quad (5.22)$$

$$K_n^{\text{после}} = K_n^{\text{до}}(1 - \lambda_n E_n), \quad (5.23)$$

Где, $K_v^{\text{до}}$, $K_n^{\text{до}}$ – коэффициенты вибрационного и шумового воздействия до применения материала;

$K_v^{\text{после}}$, $K_n^{\text{после}ter}$ – 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 можно определить через коэффициент потерь:

$$\boldsymbol{E_v = \frac{\eta_m - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}}, \quad (5.24)$$

Акустическая эффективность определяется через скорость затухания звука:

$$\boldsymbol{E_n = \frac{V_z \tau}{\Delta L_{\text{ц}}}}, \quad (5.25)$$

В инженерной практике эффективность вибродемпфирующих материалов оценивают по их способности рассеивать механическую энергию колебаний. Основной параметр при этом, коэффициент потерь η, применяется в стандартизированных методах испытаний. В частности, ASTM E756 предусматривает определение коэффициента потерь, модуля Юнга или модуля сдвига материалов для задач структурной вибрации, строительной акустики и контроля слышимого шума [289]. В русскоязычной нормативной базе коэффициент потерь также характеризует свойства вязкоупругих и демпфирующих материалов и

определяется как отношение потерь энергии к энергии, запасаемой 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.

Интегральный риск после применения материала тогда определяется как:

$$\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n^{\text{до}}(1 - \lambda_n E_n) + w_2 K_v^{\text{до}}(1 - \lambda_v E_v) + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s.} \quad (5.26)$$

или в развернутом виде:

$$\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n \left(1 - \lambda_n \frac{V_z \tau}{\Delta L_{\text{ц}}}\right) + w_2 K_v \left(1 - \lambda_v \frac{\eta_m - \eta_{min}}{\eta_{max} - \eta_{min}}\right) + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s} \quad (5.27)$$

При этом необходимо соблюдать условия:

$$\boldsymbol{0 \le E_n \le 1}$$

$$0 \le E_v \le 1$$

$$0 \le \lambda_n \le 1$$

$$0 \le \lambda_v \le 1$$

Ниже приведён расчёт эффективности виброакустодемпфирующего материала для снижения шума и вибрации дробилки.

Исходные данные до внедрения материала:

$$\boldsymbol{K_n = 0,96; K_v = 0,92; K_t = 0,88; K_e = 0,80; K_s = 0,50;}$$

Весовые коэффициенты:

$$\boldsymbol{w_1 = 0,30}, \quad \boldsymbol{w_2 = 0,30}, \quad \boldsymbol{w_3 = 0,15}, \quad \boldsymbol{w_4 = 0,15}, \quad \boldsymbol{w_5 = 0,10}$$

Виброакустический риск до внедрения:

$$\boldsymbol{R_{va}^{\text{до}} = 0,30 \cdot 0,96 + 0,30 \cdot 0,92 + 0,15 \cdot 0,88 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,10 \cdot 0,50}$$

$$R_{va}^{\text{до}} = 0{,}866$$

С учётом применения виброакустодемпфирующего материала:

$$\boldsymbol{V_z = 3}\text{дБ/с}$$

$$\tau = 2\text{с}$$

$$\Delta L_{\text{ц}} = 15\text{дБ}$$

$$E_n = \frac{3 \cdot 2}{15} = 0{,}40$$

Коэффициент реализации акустического эффекта $\lambda_n = 0{,}80$

Тогда для снижения шума:

$$\boldsymbol{K_n^{\text{после}} = 0,96(1 - 0,80 \cdot 0,40)}$$

$$K_n^{\text{после}} = 0{,}96(1 - 0{,}32) = 0{,}96 \cdot 0{,}68 = 0{,}6528$$

Для снижения вибрации:

$$\boldsymbol{\eta_m = 0,18}$$

$$\eta_{min} = 0{,}03$$

$$\eta_{max} = 0{,}23$$

$$E_v = \frac{0{,}18 - 0{,}03}{0{,}23 - 0{,}03} = 0{,}75$$

$$\lambda_v = 0{,}80$$

$$K_v^{\text{после}} = 0{,}92(1 - 0{,}80 \cdot 0{,}75)$$

$$K_v^{\text{после}} = 0{,}92(1 - 0{,}60) = 0{,}368$$

Общий риск после внедрения виброакустодемпфирующего материала:

$$\boldsymbol{R_{va}^{\text{после}} = 0,30 \cdot 0,6528 + 0,30 \cdot 0,368 + 0,15 \cdot 0,88 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,10 \cdot 0,50}$$

$$R_{va}^{\text{после}} = 0{,}19584 + 0{,}1104 + 0{,}132 + 0{,}120 + 0{,}050$$

$$R_{va}^{\text{после}} = 0{,}60824$$

$$R_{va}^{\text{после}} \approx 0{,}608$$

После применения виброакустодемпфирующего материала риск снижается до 0,608, то есть до умеренного уровня.

Полученная формула и расчет показывает, что физико–механические свойства материала напрямую связаны с уровнем профессионального риска. Чем выше коэффициент потерь и скорость затухания звука, тем ниже остаточные значения K_v и K_n, а следовательно, ниже интегральный показатель виброакустического риска.

Согласно закону сохранения энергии, снижение вибрации и шума возможно за счет увеличения доли энергии, рассеиваемой в материале. Коэффициент потерь $\boldsymbol{\eta_m}$ характеризует способность материала преобразовывать механическую энергию колебаний во внутренние потери, тем самым уменьшая амплитуду и продолжительность виброударного отклика. Скорость затухания звука $\boldsymbol{V_z}$, выраженная в дБ/с, характеризует интенсивность ослабления акустического отклика после ударного воздействия.

Следовательно, материалы с повышенным коэффициентом потерь и большей скоростью затухания звука позволяют уменьшить энергию, переходящую в вибрацию и структурный шум. Это приводит к снижению коэффициентов $\boldsymbol{K_v}$ и $\boldsymbol{K_n}$ 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 виброакустических факторов.

С позиций механики эффективность виброакустодемпфирующих материалов объясняется тем, что они:

– уменьшают амплитуду колебаний после удара;

– ускоряют затухание вибрации и звука;

– повышают долю рассеиваемой энергии;

– уменьшают структурный шум;

– ослабляют передачу вибрации на рабочие места;

– уменьшают интегральный показатель риска R_{va}.

Это и даёт основание 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 5.12. – 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

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.

Например, если до внедрения демпфирующих материалов для дробильной установки расчетный риск составлял: $\boldsymbol{R_{va} = 0,866}$, то после установки шумозащитного кожуха с виброакустодемпфирующими панелями, виброизолирующего основания и демпфирующих вставок коэффициенты могут измениться следующим образом (таблица 5.13):

Таблица 5.13. – Показатели изменения виброакустических характеристик до и после внедрения

Показатель	До внедрения	После внедрения
K_n – шумовое воздействие	0,96	0,70
K_v – вибрационное воздействие	0,92	0,65
K_t –продолжительность воздействия	0,88	0,75
K_e –техническое состояние оборудования	0,80	0,60
K_s – недостаточность защиты	0,50	0,30

Расчёт после внедрения мероприятий:

$$\boldsymbol{R_{va} = 0,30 \cdot 0,70 + 0,30 \cdot 0,65 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 0,60 + 0,10 \cdot 0,30}.$$

$$R_{va} = 0{,}210 + 0{,}195 + 0{,}1125 + 0{,}090 + 0{,}030 = 0{,}6375.$$

$$R_{va} \approx 0{,}638.$$

Следовательно, после применения виброакустодемпфирующих материалов и сопутствующих инженерных мероприятий уровень риска может быть снижен с критического 0,866 до высокого 0,638.

Применение этих материалов позволяет существенно снизить виброакустический риск.

В реальных условиях эффективность виброакустодемпфирующих материалов оценивают по общему снижению шума и по частотным уровням звукового давления. В одном диапазоне материал может хорошо гасить шум, в другом заметно хуже. Поэтому эффективность целесообразно оценивать с двух сторон:

– по снижению уровня звукового давления в частотных полосах;

– по снижению общего или корректированного уровня звука, L_A, дБА.

Уровень звукового давления определяется формулой:

$$\boldsymbol{L_p = 20\lg\left(\frac{p}{p_0}\right)}, \qquad (5.28)$$

где L_p – уровень звукового давления, дБ;

$p -$ среднеквадратичное звуковое давление, Па;

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – пороговое звуковое давление.

При оценке по частотным полосам (октавным или третьоктавным) формула 5.28 записывается так:

$$\boldsymbol{L_{p,i} = 20\lg\left(\frac{p_i}{p_0}\right)}, \qquad (5.29)$$

где $L_{p,i}$ – уровень звукового давления в i–й частотной полосе;

p_i – среднеквадратичное звуковое давление в i–й полосе.

Эффективность материала в каждой частотной полосе можно оценить как разность уровней до и после его применения:

$$\boldsymbol{\Delta L_{p,i} = L_{p,i}^{\text{до}} - L_{p,i}^{\text{после}}}, \qquad (5.30)$$

где $\Delta L_{p,i}$ – снижение уровня звукового давления в i–й частотной полосе, дБ;

$L_{p,i}^{\text{до}}$– уровень звукового давления до применения материала;

$L_{p,i}^{\text{после}}$ – уровень звукового давления после применения материала.

Формула 5.30 показывает, в каком диапазоне частот материал работает эффективнее (таблица 5.14).

Таблица 5.14. – Пример эффективности применения материала при различном диапазоне частот

Частота, Гц	$L_{p,i}^{\text{до}}$, дБ	$L_{p,i}^{\text{после}}$, дБ	$\Delta L_{p,i}$, дБ
125	92	88	4
250	96	89	7
500	99	90	9
1000	97	91	6
2000	94	90	4

Среднюю эффективность материала по частотам характеризует обобщённый показатель по частотному диапазону:

$$\overline{\boldsymbol{\Delta L_p}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{n}} \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{\Delta}\, \boldsymbol{L_{p,i}}, \qquad (5.31)$$

где $\overline{\Delta L_p}$ – среднее снижение уровня звукового давления по частотным полосам, дБ;

n – количество частотных полос.

Поскольку децибел – величина логарифмическая, уровни правильнее складывать энергетически: общий уровень по уровням в отдельных полосах находят так:

$$\boldsymbol{L_{p,\Sigma}} = \mathbf{10lg}\left(\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \mathbf{10}^{\mathbf{0.1}\boldsymbol{L_{p,i}}}\right), \qquad (5.32)$$

до применения материала:

$$\boldsymbol{L_{p,\Sigma}^{\text{до}}} = \mathbf{10lg}\left(\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \mathbf{10}^{\mathbf{0.1}\boldsymbol{L_{p,i}^{\text{до}}}}\right), \qquad (5.33)$$

после применения материала:

$$\boldsymbol{L_{p,\Sigma}^{\text{после}}} = \mathbf{10lg}\left(\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \mathbf{10}^{\mathbf{0.1}\boldsymbol{L_{p,i}^{\text{после}}}}\right) \qquad (5.34)$$

Суммарное снижение уровня звукового давления определяется так:

$$\boldsymbol{\Delta L_{p,\Sigma}} = \boldsymbol{L_{p,\Sigma}^{\text{до}}} - \boldsymbol{L_{p,\Sigma}^{\text{после}}}, \qquad (5.35)$$

На практике для оценки воздействия на работника часто используют не только частотные уровни $L_{p,i}$, но и корректированный уровень звука L_A, дБА. Он учитывает чувствительность человеческого слуха к различным частотам.

По известным частотным уровням корректированный уровень звука можно определить так:

$$\boldsymbol{L_A = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1(L_{p,i}+A_i)}\right)} \qquad (5.36)$$

где L_A −корректированный уровень звука, дБА;

$L_{p,i}$ − уровень звукового давления в i–й частотной полосе;

A_i – поправка частотной коррекции А для i–й полосы.

– до применения материала:

$$\boldsymbol{L_A^{\text{до}} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1(L_{p,i}^{\text{до}}+A_i)}\right)} \qquad (5.37)$$

– после применения материала:

$$\boldsymbol{L_A^{\text{после}} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1(L_{p,i}^{\text{после}}+A_i)}\right)} \qquad (5.38)$$

Снижение корректированного уровня звука составит:

$$\boldsymbol{\Delta L_A = L_A^{\text{до}} - L_A^{\text{после}}} \qquad (5.39)$$

При оценке материала по частотным уровням звукового давления шумовой коэффициент риска можно определить через уровень звука до и после внедрения.

– до применения материала:

$$K_n^{\text{до}} = \frac{L_A^{\text{до}} - L_{\text{доп}}}{L_{max} - L_{\text{доп}}} \quad (5.40)$$

– после применения материала:

$$K_n^{\text{после}} = \frac{L_A^{\text{после}} - L_{\text{доп}}}{L_{max} - L_{\text{доп}}} \quad (5.41)$$

Влияние материала тогда учитывается напрямую:

$$R_{va}^{\text{после}} = w_1 K_n^{\text{после}} + w_2 K_v^{\text{после}} + w_3 K_t + w_4 K_e + w_5 K_s \quad (5.42)$$

Этот вариант наиболее корректен, если есть реальные измерения шума до и после применения материала.

По результатам экспериментов исследуемые сплавы испытали в качестве акустодемпфирующих материалов. Испытания проводились с целью снизить шум и вибрацию роликов конвейера при транспортировке металлических изделий.

При транспортировке проката сильнее всего шумят удары рулонов о ролики. Поэтому уровни звукового давления мы снимали в октавах от 63 до 8000 Гц. Сравнение (рисунок 5.5) показало, что ролик с демпфирующим слоем тише обычного на 16–21 дБ на нормируемых частотах, причём больше всего на высоких. Для наглядности: 20 дБ – это в десять раз меньшее звуковое давление. Для рольгангов прокатного производства такой результат типичен [198].

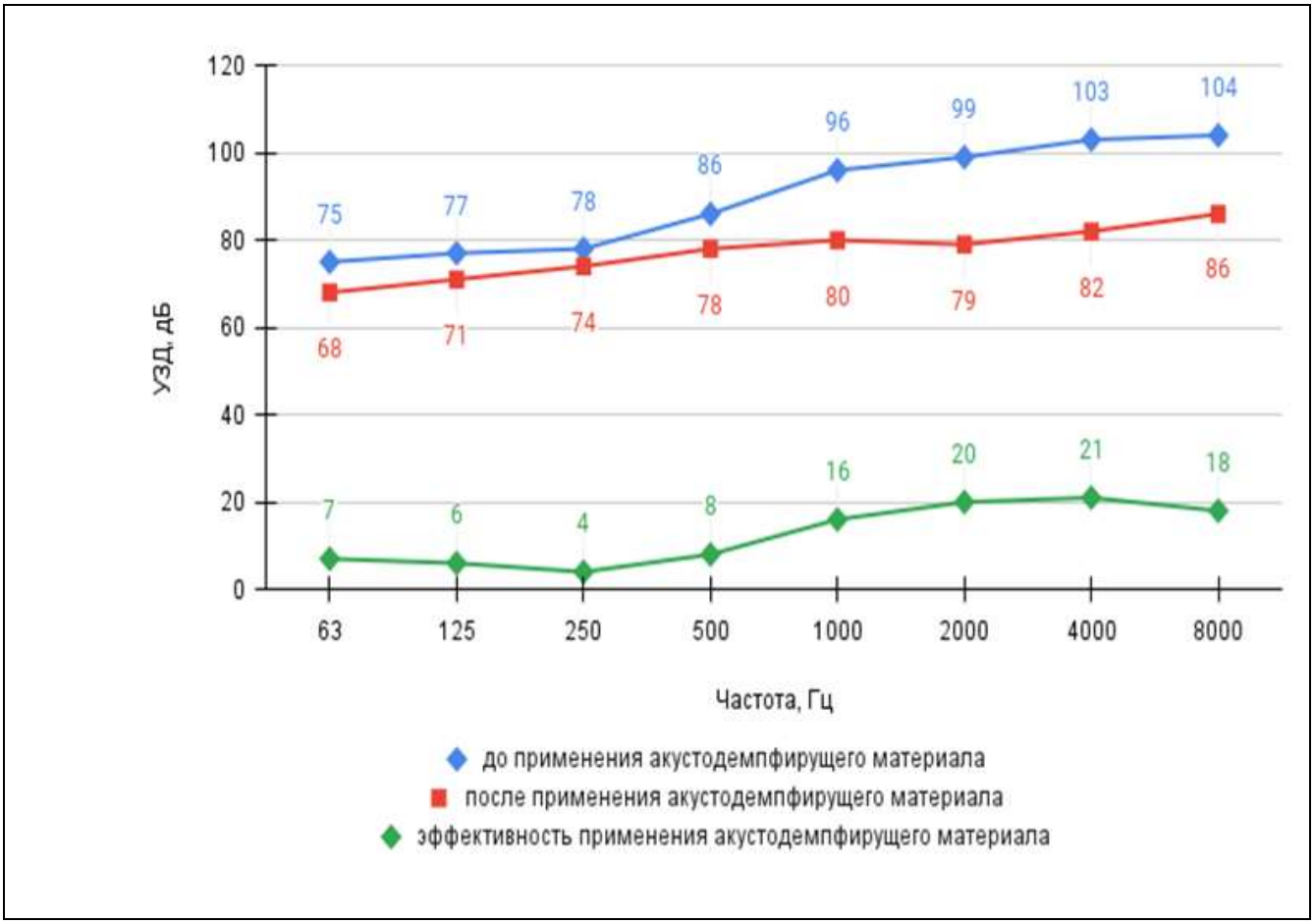


Рисунок 5.5. – Частотная зависимость уровня звукового давления конструкции ролика рольганга

Что даст внедрение модели?

Во-первых, рабочие места можно будет честно ранжировать по риску и тратить ресурсы прежде всего на самые опасные.

Во-вторых, интегральный показатель $\boldsymbol{R_{va}}$ свяжет замеры с решениями: служба охраны труда сможет цифрами обосновать кожухи, виброизолирующие основания, экраны и модернизацию.

В-третьих, раз в расчёт входит состояние оборудования, охрана труда окажется связанной с ремонтной службой – а это важно, потому что изношенная машина шумит и вибрирует сильнее.

В-четвёртых, повторная оценка после внедрения мер покажет, что действительно помогло, и не даст охране труда превратиться в бумажную работу.

Выводы к пятой главе

1. Рассмотрены методологические основы совершенствования СУОТ и мер защиты от шума и вибрации на рабочих местах промышленных предприятий Таджикистана.

2. Шум и вибрация – серьёзные вредные факторы в машиностроении, горном деле, металлургии, при ремонте механизмов. Насколько они опасны, зависит от уровня, времени контакта, состояния оборудования, организации работ и того, как работает защита.

3. Действующую практику контроля виброакустических факторов необходимо совершенствовать, переходя к риск-ориентированной модели. Модель должна учитывать уровни шума и вибрации, продолжительность воздействия, техническое состояние оборудования, обеспеченность работников средствами защиты и фактическую эффективность мероприятий.

4. Построен алгоритм совершенствования СУОТ на основе международных стандартов и цикла PDCA, включающий выявление источников шума и вибрации, измерения, расчёт риска, ранжирование рабочих мест, выбор мер защиты, внедрение мероприятий, повторный контроль и корректировку системы.

5. Система обеспечивает универсальный управленческий цикл: политика, распределение ответственности, выявление опасностей и оценка рисков, планирование мероприятий, мониторинг, аудит, непрерывное совершенствование. Однако для машиностроительных, горнорудных и металлургических предприятий модель требует развития в части управления виброакустическими факторами: повышенные шум и вибрация здесь порождаются специфическим оборудованием и виброударными процессами. Отсюда потребность в специализированной методике количественной оценки виброакустического риска и в инженерных средствах защиты на основе виброакустодемпфирующих материалов.

6. На основе анализа существующих методов оценки рисков предлагается использовать в качестве основного расчетного показателя интегральный показатель

R_{va}, учитывающий воздействие шума и вибраций, время контакта, техническое состояние оборудования и эффективность защитных мер.

7. Расчёты показывают, что предложенная интегральная модель позволяет регистрировать шум и вибрацию на рабочем месте и классифицировать производственные зоны по уровню опасности. Наибольший риск возникает при одновременно высоких уровнях шума и вибрации, большом времени воздействия и неудовлетворительном состоянии оборудования, что характерно для дробильного, ударного и вибрационного оборудования.

8. Предложенная методика оценки виброакустического риска может служить обоснованием управленческих решений в системе охраны труда промышленных предприятий Таджикистана и позволяет перейти от общей характеристики вредных факторов к адресному планированию мер по снижению профессионального риска.

9. Виброакустодемпфирующие материалы на основе алюминиевых сплавов в виде демпфирующих вставок, панелей, облицовок, кожухов, прокладок, промежуточных слоёв, виброизолирующих пластин и элементов комбинированных защитных конструкций одновременно уменьшают амплитуду механических колебаний, ослабляют передачу вибрации на несущие конструкции и структурный шум, повышают акустическую эффективность защитных кожухов и улучшают условия труда.

10. Разработан алгоритм оценки эффективности виброакустодемпфирующих материалов в СУОТ, охватывающий все этапы от выявления источников виброударных процессов до повторного контроля и корректировки решений.

11. Обычно защитные меры учитывают по принципу «установлены или нет». Предложенная схема показывает, насколько на самом деле снизился риск, потому что в неё входят коэффициент потерь (η) и скорость затухания звука ($v_{\text{зат}}$) материала.

12. Демпфирующие материалы на основе алюминиевых сплавов в деталях оборудования оправданы самой механикой удара. При соударении деталей часть

энергии уходит в колебания конструкции и в структурный шум, а колебания бегут по корпусам, рамам, опорам и кожухам и доходят до рабочих мест.

13. Чем больше у материала коэффициент потерь и скорость затухания звука, тем меньше энергии удара уходит в вибрацию и структурный шум и тем ниже коэффициенты K_v и K_n в модели риска. Применять такие материалы в конструкции оборудования для защиты работников от шума и вибрации оправдано и технически, и с точки зрения механики.

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 $\approx 53\%$). 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.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты диссертационного исследования, разработанные методики и расчётные модели могут быть использованы на промышленных предприятиях при оценке и снижении воздействия производственных виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения, выявлении источников шума и вибрации и совершенствовании условий труда работников.

Предложенные методики определения виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов, основанные на модели соударения деталей машин и методе свободных изгибных колебаний подвешенного образца, могут применяться при экспериментальном исследовании материалов, оценке их коэффициентов механических потерь и выборе эффективных конструкционных решений для снижения шума и вибрации.

Полученные результаты исследования демпфирующих характеристик алюминиевых сплавов и многослойных композиционных материалов, в том числе влияния микродобавок гадолиния и иттербия на свойства сплавов системы Al–Zn–Mg, могут использоваться при разработке и совершенствовании материалов с повышенными виброакустодемпфирующими характеристиками.

Разработанные методика расчёта звукового давления рольгангов и модель виброударного взаимодействия их элементов могут применяться при проектировании, реконструкции и модернизации металлургических и машиностроительных производств для прогнозирования уровней шума и обоснования инженерно-технических мероприятий по его снижению.

Предложенные модели совершенствования системы управления охраной труда могут быть использованы на промышленных предприятиях Республики Таджикистан при количественной оценке виброакустических рисков, разработке

профилактических мероприятий и внедрении средств инженерной защиты работников.

Материалы и методические разработки исследования также могут применяться в научно-исследовательской деятельности и образовательном процессе высших учебных заведений при подготовке специалистов в области охраны труда, техносферной безопасности и промышленной экологии. Их практическое использование будет способствовать снижению производственного шума и вибрации, повышению безопасности технологических процессов и улучшению санитарно-гигиенических условий труда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Послание Президента Республики Таджикистан Эмомали Рахмона Маджлиси Оли Республики Таджикистан, 26 декабря 2018 года. – Душанбе, 2018.
2. Послание Президента Республики Таджикистан Эмомали Рахмона Маджлиси Оли Республики Таджикистан, 21 декабря 2021 года. – Душанбе, 2022.
3. Национальная стратегия развития Таджикистана до периода 2030 года. – Душанбе, 2016 г. – 70 с.
4. Программа ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 гг. – 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 – 2024 (официальное издание) / Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан. – Душанбе, 2025. – 442 с.
7. Джабарова М.Д. Промышленность Таджикистана на современном этапе/ Вестник Таджикского финансово–экономического университета. – Душанбе, 2022, № 3.– С. 185–191.
8. Атабаева Ш.А. Современное состояние и перспективы развития промышленных предприятий Республики Таджикистан/ Экономика и предпринимательство. – 2013.– № 7. – С. 179–185.
9. Об охране труда: Закон Республики Таджикистан от 19 мая 2009 года № 517. – Душанбе, 2009. – 16 с.
10. Информационный бюллетень Службы по государственному надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Правительстве Республики Таджикистан. – 2025. – № 1. – Душанбе, 2025. – 74 с.

11. Анализ условий труда и оценки виброакустических факторов в промышленности / Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М., Хакдод М.М. // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2024. – № 3 (58). – С. 67–74.

12. Хоменко А.О., Якшина Н.В., Мушников В.С. и др. Влияние виброакустических факторов на безопасность и организм здоровье работников промышленных предприятий. Экономика труда. 2022; 9(12): С. 2175–2196. https://doi.org/10.18334/et.9.12.116410.

13. Ширванов Р.Б. Анализ существующих подходов к оценке опасностей и профессиональных рисков работников промышленных предприятий Республики Казахстан. Безопасность техногенных и природных систем. 2022; 2:14−23. https://doi.org/10.23947/2541–9129–2022–2–14–23.

14. Киселев В.Д., Малахов А.И., Суковин М.В. Анализ влияния шума на организм человека. NovaInfo. 2016; 48:20–27. URL: https://novainfo.ru/article/6813 (дата обращения: 08.03.2023).

15. Li X., Dong Q., Wang B., et al. The Influence of Occupational Noise Exposure on Cardiovascular and Hearing Conditions among Industrial Workers. Scientific Reports. 2019; 9:11524. https://doi.org/10.1038/s41598–019–47901–2.

16. Wang B., Han L., Dai S., et al. Hearing Loss Characteristics of Workers with Hypertension Exposed to Occupational Noise: A Cross–Sectional Study of 270,033 Participants. BioMed Research International. 2018;2018;7. https://doi.org/10.1155/2018/8541638.

17. Kim T.S., Chung J.W. Associations of Dietary Riboflavin, Niacin, and Retinol with Age–related Hearing Loss; An Analysis of Korean National Health and Nutrition Examination Survey Data. Nutrients. 2019;11(4)896. https://doi.org/10.3390/nu11040896.

18. Concha–Barrientos M., Campbell–Lendrum D., Steenlend H. Occupational noise: assessing the burden of disease from work–related hearing impairment at national and

local levels. Geneva: World Health Organization, 2004. (WHO Environmental Burden of Disease Series, No. 9). P. 41.

19. Huang Yu., Michael J.G. The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration. The Journal of the Acoustical Society of America. 2012; 131:4558–4569. https://doi.org/10.1121/1.4705285.

20. Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М., Хакдод М.М. Совершенствование системы охраны труда и производственной безопасности на промышленных предприятиях. //Материалы II Международной научно–практической конференции «Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны» 27–28 ноября 2025 год. ТТУ имени академика М.С. Осими, – С. 328–335.

21. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда): Учеб. пос. для вузов //П. П. Кукин, В.Л. Лапшин, Е. А. Подгорных и др. – М.: Высш. шк., 1999. – 318 с.

22. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов // С.В. Белов, А.В. Ильницкая, А.Ф. Козьяков и др. – М.: Высш. шк., 1999. – 448 с.

23. Безопасность жизнедеятельности: Учебник //Под ред. проф. Э. А. Арустамова. – М.: Изд. «Дом Дашков и К», 2000. – 678 с.

24. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие по курсу БЖД для студентов всех специальностей. // Под ред. Русака О.Н. ЛТА. СПб, 1977. – 293 с.

25. Безопасность производственных процессов: Справочник /Белов С.В., Бринза В.Н., Векшин Б.С. и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

26. Программа охраны труда в Республике Таджикистан на 2013–2016 годы: утв. постановлением Правительства Республики Таджикистан. – Душанбе, 2013.

27. Конституция Республики Таджикистан: принята всенародным референдумом 6 ноября 1994 г. (с изменениями и дополнениями от 26 сентября 1999 г., 22 июня 2003 г. и 22 мая 2016 г.). – Душанбе, 2016.

28. Трудовой кодекс Республики Таджикистан от 23 июля 2016 года № 1329. – Душанбе, 2016.

29. Абдрахманов Н.Х., Федосов А.В., Хамитова А.Н. и др. Основные аспекты оценки виброакустических факторов // Безопасность техногенных и природных систем. 2021. № 3. С. 13–20.

30. Оценка виброакустических факторов на рабочих местах промышленных предприятий и причины их возникновения / Одиназода Б.Н. // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2026. – № 1 (13). – С. 65–71. – ISSN 3105–7098.

31. Современное состояние промышленности и улучшение условий охраны труда на предприятиях / Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М. // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2026. – № 1 (64). – С. 57–65. – ISSN 2707–8000.

32. Измеров Н.Ф., Бухтияров И.В., Денисов Э.И. Оценка профессиональных рисков для здоровья в системе доказательной медицины. Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья.2016. № 1. С.14–20.

33. Филиппов Н., Агишева А.Р., Киреев И.Р. и др. Повышение безопасности производства путем применения сетевых интеллектуальных систем /Информационные технологии. Проблемы и решения: материалы междунар. науч.–практ. конф. – Уфа, 2017. – № 1 (4). – С. 109–118.

34. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Куралесин Н.А., Овакимов В.Г. Инфразвук как фактор риска здоровья человека. Воронеж: Истоки, 1998 г., 276 с.

35. Гидаятова М.О., Ямщикова А.В., Флейшман А.Н. Клинико–электронейромиографическое исследование у шахтёров с профессиональной полинейропатией верхних конечностей. Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 7. С. 713–717.

36. Гаскарова Ф. Н. Проблема реальной эффективности средств индивидуальной защиты от шума / Ф.Н. Гаскарова, Г.М. Шарафутдинова // Актуальные проблемы науки и техники: сб. науч. тр. – Уфа, 2017. – С.81–83.

37. Вадулина, Н. В. Профессиональная заболеваемость в России: проблемы и

решения / Н. В. Вадулина, М. А. Галлямов, С. М. Девятова // Безопасность техногенных и природных систем: [сайт]. – 2020. – № 3. – С. 7–15.

38. Николенко В. Ю. От локальной вибрации до вибрационной болезни / В. Ю. Николенко, Н. Д. Ласткова // Международный неврологический журнал. – 2011. – № 1(39). – С. 131–139.

39. Ассоциация врачей и специалистов медицины труда. Вибрационная болезнь: клинические рекомендации. – М., 2021. – 134 с.

40. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23–03–2003 (с Изменениями № 1–4). – М.: Минстрой России, 2023. – 71 с.

41. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. Изд. 2–е. – М.: Стройиздат, 1969. – 196 с.

42. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979. – 184 с.

43. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. – Л.: Судостроение, 1986. – 368 с.

44. Brown S.M. Sound and Vibration, 1977, v. 11, № 4, p.28–33.

45. Kaufman J.G., Material Design Engineering, 1962, v.56 N2, p. 104–105.

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

47. Охрана труда в трубном производстве / Л.В. Ленская, Ю.Н. Ленский, Н.А. Лавренко и др. – М.: Металлургия, 1986. – 152 с.

48. Борьба с вибрацией и шумом в кузнечном производстве /Г.В. Дуганов, А.И. Храмой, М.С. Коган и др. – Киев: Техника, 1984. – 101 с.

49. Dambolu E., Metallurgia, 1974, v.31, N3, p.121–126.

50. Авиационная акустика: в 2 ч. Ч. 2. Шум в салонах пассажирских самолётов / А.Г. Мунин, Б.М. Ефимцов, Л.Я. Кудисова и др.; под ред. А.Г. Мунина. – М.: Машиностроение, 1986.

51. 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.

52. Седов М.С., Кочкин А.А. О звукоизоляции слоистых вибродемпфированных панелей и их применение в условиях эксплуатации. В кн.: «Акустическая изоляция помещений и оборудования в промышленности и на транспорте». – Л.: 1985. – с. 13–16.

53. Исаков В.М., Федорович М.А. Виброшумозащита в электромашиностроении. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 206 с., ил.

54. Скурихин М.Н., Каллистратов О.Н., Бычихин Г.А. Композиционные демпфирующие сплавы и области их применения в качестве конструкционных материалов. – Черная металлургия, бюл. Ин–та «Черметинформация», 1986, № 23, с 2–11.

55. Хакдодов М.М. Металлическая композиция с демпфирующим слоем из сплавов, обладающих эффектом сверхпластичности. В сб. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. – М.: 2000 г.

56. Утепов Е.Б., Хохлов П.П. и др. Разработка малошумных сплавов. – Алматы, 1998. 112 с.

57. TokitavV. – Journal of the Acoustical Society of Japan, 1960. – vol. 16.– № 3. – p.170.

58. Takahagi T., et. al. – Journal of the Acoustical Society of Japan, 1980. – vol. 1.– № 2. – p.121.

59. Баланцев С.К., Белов С.В. Исследование акустических характеристик пористых металлов и глушителей шума. //Труды МВТУ. – 1979. –№ 308.

60. Новый конструкционный материал ДЗО–МП/М.Н. Скурихин, Н.М. Гевская, Ф.Р. Карелин и др. – Сталь, 1986. № 9, с. 82–85.

61. Shimizu, T.; Funakoshi, H.; Kobayashi, T.; Sugimoto, K. Reduction of noise and vibration in drum type washing machine using Q–learning. Control. Eng. Pract. 2022, 122, 105095.

62. Driscoll M.M., Donovan J.B. Vibration–Induced Phase Noise: It Isn't Just About the Oscillator. In Proceedings of the 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, Switzerland, 29 May–1 June 2007; pp. 535–540.

63. Stansfeld S.A., Clark C., Cameron R.M., Alfred T., Head J., Haines M.M., van Kamp I., van Kempen E., Lopez–Barrio I. Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health // Journal of Environmental Psychology. – 2009. – Vol. 29, № 2. – P. 203–207. – DOI: 10.1016/j.jenvp.2009.01.002.

64. Batessova F.; Omirbay R.; Sattarova G.; Zholmagambetov N.; Zholmagambetov S.; Dostayeva A.; Suleimenov N.; Medeubayev N. Reducing industrial noise by the use of damping alloys when manufacturing mining equipment parts. Heliyon 2023, 9, E17152.

65. Schaller R. 8.7 High Damping Materials. Mater. Sci. Forum 2001, 366–368.

66. Peltier L.; Lohmuller P.; Meraghni F.; Patoor E.; Laheurte P.; Berveiller S. Damping Behavior in a Wide Temperature Range of FeMn–Like High Entropy Shape Memory Alloys. Shape Mem. Superelast. 2022, 8, 335–348.

67. Gholami–Kermanshahi, M.; Wu, Y.–Y.; Lange, G.; Chang, S.–H. Effect of alloying elements (Nb, Ag) on the damping performance of Cu–Al–Mn shape memory alloys. J. Alloys Compd. 2023, 930, 167438.

68. Saedi S.; Acar E.; Raji H.; Saghaian S.E.; Mirsayar M. Energy damping in shape memory alloys: A review. J. Alloys Compd. 2023, 956, 170286.

69. Mohamed A.K., Zadorozhnyy M.Y., Mansouri Y., Golovin I.S. Magnetostriction and damping of forced vibrations in Fe–Cr–Mo– Al alloy. Mater. Lett. 2022, 314, 131863.

70. Holmer C.J., Lagace A. Effect of structural damping on the sound radiated from impacted structures – American Industrial Hygiene Association Jour. 1972. – vol. 33. – № 1. p. – 12–18.

71. Kerwin J.M. Damping of flexural wowes by a constrained vicoelastic layer – JASA, 1959. – vol. 31. – № 7. – p. 952–963.

72. Демпфирующий материал из сплава алюминия: Заявка 3–264634 Япония, МКИ5 С22 С22/00. Опубл. 25.11.91 / Кокай Токке Кохо. Сер. 3(4). – 1991. – 72. – с. 199–203.

73. Конструкционные слоенные материалы с высокими потерями / Авилова Г.М. Наумкина Н.И., Тартаковский Б.Д. и др.– В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. Киев.: Наукова думка, 1972. – с. 230–236.

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

75. Wang J., Zou Y., Dang C., Wan Z., Wang J., Pan F. Research Progress and the Prospect of Damping Magnesium Alloys // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 2–29. – DOI: 10.3390/ma1706128.

76. Лашко Н.Ф., Лашко–Авакян С.В. Металловедение сварки. М.: Машгиз. 1954.– 272 с.

77. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 1. – С. 5–9.

78. Астров Е.И. Плакированные многослойные металлы. М.: Металлургия, 1965. – 239 с.

79. Король В.К., Гильденгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. М.: Металлургия, 1970. – 237 с.

80. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение. 1970. – 312 с.

81. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. – 263 с.

82. Голованенко А.С. Сварка прокаткой биметаллов. М.: Металлургия, 1977. – 158 с.

83. Айбиндер С.Д. Холодная сварка металлов. Рига: Из–во АН Латв. ССР, 1957. – 163 с.
84. Хренов К.К. Новости сварочной техники. Киев.: Из–во АН УССР, 1949.–186с.
85. Powell B.R., Krajewski P.E., Luo A.A. Chapter 4–Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures. In Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, 2nd ed.; Mallick, P.K., Ed.; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2021; pp. 125–186.
86. Tahreen N., Zhang D.F., Pan F.S., Jiang X.Q., Li D.Y., Chen D.L. Strengthening mechanisms in magnesium alloys containing ternary I, W and LPSO phases. J. Mater. Sci. Technol. 2018, 34, 1110–1118.
87. Mallick P.K. Advanced materials for automotive applications: An overview // Advanced Materials in Automotive Engineering. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. – P. 5–27.
88. Wan D., Wang H., Ye S., Hu Y., Li L. The damping and mechanical properties of magnesium alloys balanced by aluminum addition. J. Alloys Compd. 2019, 782, 421–426.
89. Джураев Т.Д., Газизова Э.Р., Хакдодов М.М., Никитин К.В., Рахимов Ф.К., Тошев М.Т. Инновационные технологии получения и применения акустодемпфирующих алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 15–17.Металлургия машиностроения№5
90. Влияние пластической деформации и термической обработки на акустодемпфирующие и механические свойства многокомпонентных алюминиевых сплавов / Хакдодов М.М., Одиназода Б.Н., Вазиров Н.Ш. // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2011. – № 2 (14). – С. 24–28.
91. Хакдодов М.М. Влияние физико-химического состояния переходной зоны на демпфирующие свойства композиционных материалов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 10. – С. 36.Металловедение и термическая обработка металлов№ 10

92. Ганиев И.Н., Махмадуллоев Х.А., Хакдодов М.М. Модифицирование вторичных силуминов барием и сурьмой // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С. 27. Литейщик России.

93. Хакдодов М.М. Проблемы использования и перспективы применения акустодемпфирующих материалов для снижения шума механического происхождения. – Деп. рукопись № 22–Тад2001. – Душанбе, 2001.

94. Ганиев И.Н., Вахобов А.В., Хакдодов М.М., Махмадуллоев Х.А. Разработка и внедрение в производство новых литейных алюминиевых сплавов, стронцийсодержащих лигатур и модификаторов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 10. – С. 35.Металловедение и термическая обработка металлов№10

95. Хакдодов М.М. Выбор листовых материалов для изготовления слоистых композитов и методика их исследования. – Деп. рукопись № 24–Тад2001. – Душанбе, 2001.

96. Физико–химические акустодемпфирующих материалов на основе силуминов. /Одиназода 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.

97. Хакдодов М.М. Разработка и исследование акустодемпфирующих свойств композиционных листовых материалов с вязкоупругим слоем. – Деп. рукопись № 25–Тад2001. – Душанбе, 2001.

98. Хакдодов М.М. Разработка и исследование акустодемпфирующих свойств металлических композиций на основе конструкционных металлов и сплавов, обладающих сверхпластичностью. – Деп. рукопись № 23–Тад 2001. – Душанбе.

99. Физико–химические закономерности структурообразования в деформируемых алюминиевых сплавах / Хакдодов М.М., Одиназода Б.Н., Бобоев

С.О., Талбаков С.Г. // Материалы II международной научно–практической конференции. Чкаловск: Государственный металлургический институт Таджикистана, 2008. – С. 69–74.

100. Джураев Т.Д., Газизова Э.Р., Ходжиев Г.К., Хакдод М.М. Мелкокристаллическая лигатура как матрица генома при модифицировании алюминиевых сплавов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 3 (47). – С. 66–70.Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования№3 (47)

101. Nouha L. Alloying Elements of Magnesium Alloys: A Literature Review. In Magnesium Alloys Structure and Properties; Tomasz T., Paweł J., Eds. Intech Open: Rijeka, Croatia, 2021; p. 9.

102. Rhamdani A.R., Rhamdhani M.A., Brooks G., Pownceby M.I., Nugraha Thaha Y., Abbott T.B., Grandfield J., Hartley C. The Production of Rare Earth based Magnesium and Aluminium Alloys–A Review. Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2023, 1–24.

103. Nasiri Z., Ghaemifar S., Naghizadeh M., Mirzadeh H. Thermal Mechanisms of Grain Refinement in Steels: A Review // Metals and Materials International. – 2021. – Vol. 27. – P. 2078–2094.

104. Mordike B.L. Creep–resistant magnesium alloys. Mater. Sci. Eng. A 2002, 324, 103–112.

105. Rokhlin L.L. Dependence of the rare earth metal solubility in solid magnesium on its atomic number. J. Phase Equilibria 1998, 19, 142–145.

106. Kula A., Jia X., Mishra R.K., Niewczas M. Mechanical Properties of Mg–Gd and Mg–Y Solid Solutions. Metall. Mater. Trans. B 2016, 47, 3333–3342.

107. Yasi J.A., Hector L.G., Trinkle D.R. First–principles data for solid–solution strengthening of magnesium: From geometry and chemistry to properties. Acta Mater. 2010, 58, 5704–5713.

108. Ma Y., Liu C., Jiang S., Gao Y., Wan Y., Chen Z. A study of high damping capacities and mechanical properties of cast Mg–Gd binary alloys. Mater. Lett. 2022, 320, 132363.

109. Демпфирующий материал из сплава алюминия и способ его получения: Заявка 3–264637 Япония, МКИ5 С22 С21/06 С22 F1/047/ Кокай Токке Кохо. Сер. 3(4) – 1991. – 72. – с. 217–224.

110. Демпфирующий материал на основе алюминиевого сплава и способ его получения: Заявка 4345 Япония, МКИ5 С22 С21/00. Опубл. 6.1.92 / Кокай Токке Кохо. Сер. 3(4) – 1992. – 1. – с. 255–258.

111. Демпфирующий материал на основе алюминиевого сплава и способ его получения: Заявка 4347 Япония, МКИ5 С22 С21/00,С21/06. Опубл. 6.1.92 / Кокай Токке Кохо. Сер. 3(4) – 1992. – 1. – с. 265–270.

112. Способ получения материала на основе алюминиевого сплава: Заявка 42747 Япония, МКИ5 С22 F21/04, С 22 С21/00. Опубл. 7.1.92 / Кокай Токке Кохо. Сер. 3(4) – 1992. – 2. – с. 351–321.

113. Саидов Р.Х., Хакдодов М.М., Кобулиев З.В. Демпфирующие свойства алюминиево–бериллиевых сплавов, легированных редкоземельными металлами // Химия и проблемы экологии: Тез. докл. Международной научной конференции. – Душанбе, 1998. с 54–55.

114. Амонов И.Г., Хакдодов М.М., Бердиев А.Э. Демпфирующая способность алюмине–железных сплавов, легированных РЗМ // В сб.: Трудов ученых Таджикистана. – Душанбе, НПИЦентр, 2001.

115. Рахмонов К.А., Хакдодов М.М., Бердиев А.Э. Демпфирующие свойства двойных алюминиевых сплавов, легированных РЗМ // В сб.: Трудов ученых Таджикистана. – Душанбе, НПИЦентр, 2001.

116. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сврехпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.

117. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия. 1975. – 279 с.

118. Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов. Пер. с польск. – М.: Металлургия, 1975. – 272 с.

119. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. – М.: Металлургия, 1981. – 166 с.

120. О промышленном изготовлении сверхпластичного латунного листа / Б.Е. Ефремов, В.Н. Федоров, В.Д. Кожин и др. // Цветные металлы. – 1984. – № 8. – с. 82–85.

121. Строганов Г.Б., Новиков И.М., Пширков В.Ф. Сплавы для сверхпластического формообразования деталей авиационной техники. – М.: Министерство авиационной промышленности СССР. Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации». 1984. – 70 с.– ДСП.

122. Nuttall K. – «J. Jnst. Metalls» 1971. – vol. 99. – p 266.

123. Roberts J.T.A., Barrand P. – “Trans. AJME”, 1968. – vol. 242. – p. 2299.

124. Arushima A., Miygawa M. – “Trans of the Jron and steel Institute of Japan”, 1987. – vol. 27. – № 9 – p. 719.

125. О механизмах трения в сверхпластичном и несверхпластинчом состояниях сплавов висмут–олово / В.А. Патеримов, Г.К. Мальцева, В.С. Новоселов и др. – В кн.: Внутреннее трение в металлах и неорганических материалах. – М.: 1982. – с. 88–92.

126. Термоупругое деформирование слоистых композитных оболочек и пластин. / Одиназода 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.

127. Новые вибропоглащающие материалы и покрытия, и их применение в промышленности / Под ред. А.С. Никифорова. Л.: Знание, 1980–100 с.

128. Кинетика изменения прочности сцепления и акустодемпфирующие свойства слоистых металлических композиций в зависимости от степени пластической деформации и температуры отжига. / Одиназода 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.

129. Экспериментальные методы определения акустодемпфирующих характеристик металлических материалов. / Одиназода 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.

130. Сазонова Н.Д., Колесник В.П. Сверхпластичность металлов. «Итоги науки и техники ВИНИТИ. Машиностроительные материалы. Конструкции и расчет деталей машин. Гидропривод». – 1983. – 8. – с. 3–48.

131. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях механических систем. М.: Физматгиз. 1960. – 175 с.

132. Хакдодов М.М. Снижение шумов механического происхождения на основе создания композиционных акустодемпфирующих материалов: научные основы и технологии получения: дис. … д-ра техн. наук: 05.26.01. – Душанбе, 2001. – 336 с.

133. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение. 1976. – 312 с.

134. Семенов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. – 280 с.

135. Потапов И.Н., Лебедев В.Н., Кобелев А.Г. и др. Слоистые металлические композиции / М.: Металлурги, 1986. – 216 с.

136. Шоршоров М.Х., Дзиалаидзе Э.М., Тихонов А.С. и др. – Сварочное производство, 1975, № 10, с 20–22.

137. Тихонов А.С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. М.: Наука, 1978. – 134 с.

138. Справочник по контролю промышленных шумов: пер. с англ. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1979. – 447 с., ил.

139. Ross D., Ungar E.E., Kerwin E.M. Damping of plate flexural vibrations by means viscoelastic laminal. – structural damping, Pergamon press, 1960. – p. 49–87.

140. Дятченко С.В., Корягин С.И. и Яковлев А.П. Демпфирующие свойства листовых материалов армированными полимерными покрытиями //Пробл. прочности. – 1986. – № 4. – с. 114–118.

141. Лысенко А.В., Копань В.С., Михалков В.Д. Механизмы внутреннего трения в полупроводниках и металлических материалах. М.: Наука, 1972. – с. 134–137.

142. Астров Е.И., Шоткин Ю.А., Судник Л.В. Демпфирующие свойства и ударная вязкость многослойных материалов. – Порошковая металлургия, 1980. – № 12. – с. 29–31.

143. Качанов И.М. Кривоногов Г.С. Высокопрочный трехслойный материал с повышенными демпфирующими свойствами. – Проблемы прочности, 1975. – № 9. – с. 69–72.

144. Наумкина Н.И., Тартаковский Б.Д. Сравнение эффективности демпфирования изгибных колебаний пластины однослойным и армированным вибропоглошающими покрытиями. – Акус. Журнал, 1985. – 31 – № 5 – с. 620–624.

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

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

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

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

149. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справ. изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1985. – 352 с.

150. Применение алюминиевых сплавов: Справ. изд. / Альтман М.Б., Андрева Г.Н., Арбузов Ю.П. и др. 2–е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия. 1985. 344 с.

151. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. Изд. /Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. – 3–е изд. переаб. и доп. – М.: Металлургия. 1984. 528 с.

152. Jorgiandis A. – "Product Engineering", 1954, p. 164–170.

153. Dey B.N. – "Journal of physical society of Japan", 1985, vol 20. № 4. p 533–540.

154. Дриц М.Е., Рохлин Л.Л., Рючина Г.В. – МиТОМ, 1972, № 8. с 5–7.

155. Дриц М.Е., Рохлин Л.Л., Рючина Г.В. –«Проблемы прочности», 1972, № 6. с 48–51.

156. Просвирин В.И., Маргунов Н.Н. – «Труды ЦНИИТмаш» М.: Машгиз, 1952, кн.: 49, с 37–40.

157. Гликман Л.А., Писаревский М.М., Снежкова Г.Н. – ЖТФ, 1963, вып. 3, с – 17–19.

158. Алюминиевый сплава с высокой демпфирующей способностью. Заявка 2173238 Япония, МКИ5 С22, С21/02, С22, С21/10 / Курофути Тоцуфуми, К.К. Касэй Наоэцу. Опубл 04.07.90 // Кокай Токке Кохо 3 (4) – 1990 – 46. с. 205–209.

159. Получение алюминиевого сплава с высокой демпфирующей способностью: Заявка 3232950 Япония: опубл. 16.10.91 / Кокай Токке Кохо 3(4) – 1991 – 63. с. 321–325.

160. Ширванов Р.Б., Жумагалиев И.К. К вопросу оценки уровня шумовых и вибрационных воздействий на работников промышленных предприятий Республики Казахстан. Безопасность техногенных и природных систем. 2023;7(2):47–57. https://doi.org/10.23947/2541–9129–2023–7–2–47–57.

161. Статистический ежегодник Республики Таджикистан – 2022 (официальное издание) / Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан. г. Душанбе, 2022 – 415 с.

162. Влияние легирующих составляющих на физико–химические и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов. / Одиназода 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.

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

164. Карабалин С.К., Ниязбекова Л.С., Сейдуанова М.К. и др. Гигиеническая оценка шумо–вибрационного фактора на горно–обогатительных производствах. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019;12(1):71–75.

165. Аденинская Е.Е., Симонова Н.И., Мазитова Н.Н. и др. Принципы диагностики потери слуха, вызванной шумом, в современной России (систематический обзор литературы). Вестник современной клинической медицины. 2017;10(3):48–55. https://doi.org/10.20969/VSKM.2017.10(3).48–55.

166. Спирин В.Ф., Старшов А.М. К некоторым проблемам хронического воздействия производственного шума на работающих (обзор литературы) // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 1. – С. 186–196. – DOI: 10.21668/health.risk/2021.1.19.

167. Федина И.Н., Преображенская Е.А. Особенности снижения слуха, вызванного шумом, в современных условиях. Медицина труда и промышленная экология. 2017; 9:200–201.

168. Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Тихонова Г.И. и др. Условия труда как фактор риска повышения смертности в трудоспособном возрасте. Медицина труда и промышленная экология. 2017; 8:43–49.

169. Staseva E., Kvitkina M., Litvinov A., et al. The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases. In: E3S Web of Conferences. 2020;164(2):01028. P.2–8. https://doi.org/10.1051/e3sconf /202016401028.

170. Алексеев С.П. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1977.
171. Лагунов Л. Ф., Осипов Г. Л. Борьба с шумом в машиностроении. М.: Машиностроение, 1980 150 с.
172. Козочкин М. П. Снижение шума станков и их узлов – Экспресс–информация Металлорежущие станки и автоматические линии, М. 1979, № 10, с 20–27.
173. Ильяшук Ю.М., Слободник Д.Х., Трандина З.В. Исследования акустической эффективности малошумных направляющих труб токарных автоматов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – 1972. – Вып. 79. – С. 40–43.
174. Медведь Р. А., Соловьев Р. В. Производственный шум и борьба с ним. Из опыта Горьковского автомобильного завода Горький– Волго– Вятское книжное издательство, 1977. 127 с.
175. Ступак Н. М., Носач В. А. Снижение шума в токарно–револьверных станках н автоматах – Технология н организация производства, 1976, № 11, с 64–65.
176. Кудинов В. А. Динамика станков М– Машиностроение, 1967. 360 с.
177. Berg P.-A., Elvhammar H. Noise Problems by Turning in Lathes // Proceedings of the 1977 International Conference on Noise Control Engineering. – Zurich, 1977. – P. 288–300.
178. Берестиев О. В. Зубчатые колеса пониженной виброактивносги. Минск, Наука и техника, 1978 120 с.
179. Климов Б. И. Современные тенденции развития вибро– и звукозащитных систем полиграфических машин. М: Книга, 1983. 48 с.
180. Заборов В. И., Клячко Л. Н., Росин Г. С. Защита от шума и вибрации в черной металлургии. М. Металлургия, 1976 248 с.
181. Никифоров А. С., Будрин С. В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах Л. Судостроение, 1968. 96 с.
182. Защита от повышенного шума и вибрации: доклады V Всероссийской научно–практической конференции с международным участием (Россия, Санкт–Петербург,

18–20 марта 2015 г.) / под ред. Н.И. Иванова – Санкт–Петербург: Изд–во «Айсинг», 2015; – 701 с.

183. Иванов Ю.В. Разработка систем защиты от шумов и вибраций кузнечно–прессовых машин и агрегатов – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт–Петербург 2018. 43 с.

184. Медведев А.М., Литовка Г.В. Оценка звукоизлучения корпусных конструкций металлорежущего оборудования // Обработка металлов. – 2008. – № 2 (39). – С. 4–7.

185. Медведев А.М., Литовка Г.В., Станийчук А.В. и др. Оценка источников звукоизлучения в металлорежущих станках // Вестник АмГУ. – 2009. – Вып. 45. – С. 8–13.

186. Шумовые характеристики кузнечно–прессовых машин. Нормативы и методы определения. РТМ2–Н89–6–79. Воронеж. ЭНИК– МАШ, 1980. 48 с.

187. Вервекин Э.Д., Гусев В.В., Кузнецов В.И. Исследования шумообразования при работе механических прессов и разработка мер по его уменьшению – В кн. Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 1973, вып 81, с 70–74.

188. Заборов В. И., Клячко Л. Н., Шигорин П. И. Снижение шума гвоздильных автоматов. – В кн.: III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией Борьба с шумом Челябинск– ВНИИТБ– чермет, 1980, с 35–38.

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

190. ПРЕСС–РЕЛИЗ по итогам деятельности ОАО «Таджикская алюминиевая компания» в первом полугодии 2024 года, 4 с.

191. ПРЕСС–РЕЛИЗ по итогам деятельности ОАО «Таджикская алюминиевая компания» в первом полугодии 2023 года, 4 с.

192. Тимофеев С.С., Никитина О.И. Профессиональные риски при производстве алюминия на предприятиях Восточной Сибири // XXI век. Техносферная безопасность. 2017. Т. 2. № 1. С. 44–54.

193. Колеганова Н.С., Миракилов Ш.В. Управление рисками на объектах алюминиевой промышленности (на примере ОАО ТАЛКО РТ)/ Технологии гражданской безопасности, 2011, том 8, № 4 (30), с.90–93.

194. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учеб. пособие для машиностроительных вузов. – 3–е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

195. Колесников А. Г., Яковлев Р. А., и др.Технологическое оборудование прокатного производства. М.: Изд–во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 158 с.

196. Ролик рольганга, преимущественно прокатного стана: а. с. 638392 СССР / В.Н. Бринза, Ю.Л. Зарапин и др. – Опубл. 25.12.1978, Бюл. № 47.

197. Ролик рольганга: патент Украины № 95062854 / А.И. Буря, А.А. Буря, Н.Я. Попов и др. – Бюл. № 7, 2001.

198. Ролик рольганга: малый патент Республики Таджикистан № TJ 1535, МПК B 65G 39/00, № 2301896 / М.М. Хакдод, Б.Н. Одиназода. – Заявл. 23.10.2023; опубл. 20.09.2024, Бюл. № 211, 2024. – 3 с.

199. Хакдод М.М., Одиназода Б.Н., Хакдодов А.М. Применение акустодемпфирующих материалов для защиты от виброакустических факторов на машиностроительных предприятиях/ Материалы Международной конференции «Современные задачи машиностроительной промышленности» Душанбе: Издание ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2024. – С. 51–53.

200. Кедрова Е. И. Модель виброакустической динамики подающих вальков приводных роликовых конвейеров. Журнал теория и практика, 2024. С. 38–45.

201. Глинкин А.С. Моделирование шумообразования несущей системы рольганговых механизмов. Журнал Noise Theory and Practice, 2022. С. 59–68.

202. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. – Ленинград: Судостроение, 1972. – 349 с.

203. Чукарин А. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки. – Ростов на Дону: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 152 с.

204. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций: справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 200 с.

205. Виброакустодемпфирующие свойства модифицированных литейных алюминиевых сплавов системы Al–Si / Одиназода Б.Н., Хакдод М.М. // Фурӯғи илм. Бахши «илмҳои табиӣ – риёзӣ». – 2026. – № 2 (10). – С. 20–27.

206. Борьба с шумом на производстве: справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с., ил.

207. Хакдодов М.М. Устройство для исследования акустодемпфирующих свойств металлических материалов: малый патент Республики Таджикистан № 0700158 от 11.12.2007. – Бюл. № 49 (1), 2008.

208. Хакдодов М.М., Одиназода Б.Н., Бобоев С.О. Акустодемпфирующие материалы из деформируемых алюминиевых сплавов: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 144 с.

209. Перспективы использования акустодемпфирующих материалов при решении задач материаловедения и инженерной акустики. / Хакдодов М.М., Одиназода 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.

210. 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 «Геоинформационные науки для устойчивого развития» Душанбе, 2017.–С.124–132.

211. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Стронций – эффективный модификатор силуминов // Литейное производство. – 2000. – № 5. – С. 28–29.

212. Вахобов А.В., Хакдодов М.М. Некоторые проблемы наследственности в неорганической природе // Труды 5-го съезда литейщиков России. – М.: Радуница, 2001. – С. 25–26.

213. Cremer H., Cremer L. Theorie der Entstehung des Klopfschalls // Frequenz. – 1948. – Bd. 2, № 3. – S. 61–71.

214. Саидзода Р.Х. Структурообразование и физико-химические свойства лёгких алюминиевых сплавов с редкоземельными и щелочноземельными металлами: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.01. – Душанбе, 2017. – 293 с.

215. Амонзода И.Т. Структурообразование и свойства алюминиевого сплава АЖ18 с элементами II–IV групп периодической таблицы: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.01. – Душанбе, 2020.

216. Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В. и др. Модифицирование силуминов стронцием. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.

217. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с участием бария и стронция. – Душанбе: Дониш, 1992. – 296 с.

218. Ганиев И.Н., Вахобов А.В., Хакдодов М.М. Новые литейные алюминиевые сплавы, не требующие модифицирования // Труды 5-го съезда литейщиков России. – М.: Радуница, 2001. – С. 215–217.

219. Гохштейн М.Б., Васильева Л.С. О механизме модифицирования силуминов. – МиТОМ. 1970, № 7, с.42.

220. Тен В.Н. Снижение шума и звуковой вибрации конструкций с применением высокодемпфированных сплавов: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1986. – 21 с.

221. Колядина Е.В. Снижение звуковой вибрации конструкций при применении композиционных материалов на основе гранул алюминиевых сплавов: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 1986. – 19 с.

222. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 208 с.

223. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

224. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с., ил.

225. Мастеров В.А. Практика статистического планирования эксперимента в технологии биметаллов. – М.: Металлургия, 1974. – 160 с.

226. Шаповал Б.И., Аржавитин В.М. Внутреннее трение некоторых чистых и композиционных материалов. М.: ЦНИИатоминформация, 1984. – 58 с.

227. Jgarashi T., Aumoto T. Studies on impact sound. (Second report, mechanism of sound generation). – "Bull JSME" 1985. – vol. 28. – № 240. – p. 1247–1254.

228. Белов А.И., Файнштейн Н.Д. Звук и вибрация при соударении сферы с пластиной. – Журнал технической физики, 1939. – т.9. – № 6. – с. 723–725.

229. Злобинский Б.М. Муравьев В.А. Звукоизлучение чугунов. – МиТОМ, 1971. – № 11. – с. 49–52.

230. Парфенов А.А. К методике определения акустических характеристик металлических материалов // Труды МИСиС. – 1981. – № 127. – с. 75–79.

231. Schad G.R., Warlimont H. Akustishe Undersuchungen zum Einflup des werkstoffs auf den klang won Gloken. – Akustica, 1973. – vol. 29. –№ 1 – p. 1–14.

232. Авилова Г.М. Оптимизация параметров трехслойных вибропоглощающих конструкций с использованием ЭЦВМ. – В. кн.: Кибернетическая диагностика механических систем по виброакустическим процессам. Каунас, 1972. – с. 73–75.

233. Бринза В.Н., Белов А.В. О механизме демпфирования звуковых колебаний в металлических композиционных материалах. – В сб.: Проблемы инженерной охраны труда. – М.: – 1981. с. 84–88.

234. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.

235. Головин С.А., Пушкар А.А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. С– 190.

236. Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем. – Киев: Наукова думка, 1976. – 86 с.

237. Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1971. – 190 с.

238. Головин С.А., Левин Д.М., Петрушин Г.Д. Демпфирующие металлические материалы. В сб.: Тезисы докладов V научно–технической конференции. – Киров, 1988. – с. 98–99.

239. Температурный расчет при прокатке высоких полос в скрещенных валках. /Одиназода Б.Н.// Материалы II международной научно–практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2007. – С. 332–335.

240. 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 материаловедение. – 2023. – № 2 (62). – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. – С. 99–104. – ISSN 2520–2227.

241. Хакдод М.М., Одиназода Б.Н., Бозоров Ш.А. Установка для исследования акустодемпфирующих свойств металлических материалов: малый патент Республики Таджикистан № TJ 1553, зарегистр. 11.11.2024.

242. Одиназода Б.Н., Хакдодов М.М., Хакдод М.М. Об усовершенствовании методики исследования акустодемпфирующих свойств металлов и сплавов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 4 (72). – С. 27–31. – ISSN 2520–2227.

243. Средства защиты в машиностроении: расчёт и проектирование: справочник / под ред. С.В. Белова и др. – М.: Машиностроение, 1989.

244. Трунова И.Г., Елькин А.Б., Смирнова В.М. Выбор и расчёт средств защиты от шума и вибрации. – Нижний Новгород: НГТУ, 2012. – 120 с.

245. 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.

246. Моделирование виброакустических процессов в рольганговых механизмах / Одиназода Б.Н., Хакдодов М.М., Хакдод М.М. // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2026. – № 1 (13). – С. 11–16. – ISSN 3105–7098.

247. Силумины. Атлас микроструктур и фрактограмм промышленных сплавов: справ. изд. / А.Г. Пригунов, И.А. Белов, Ю.Н. Таран и др.–М.: МИСиС, 1996.–175 с.

248. Влияние химических добавок на акустодемпфирующие свойства алюминиевых сплавов. / Одиназода 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 ак. М.С. Осими, 2007. – С.51–54.

249. Никитин В.И. Основные закономерности структурной наследственности в системе «шихта – расплав – отливка» // Литейное производство. 1991, № 4 –с.4–5.

250. Влияние вибрационной обработки расплава на акустодемпфирующие свойства модифицированных силуминов/ Хакдодов М.М., Махмадуллоев Х.А., Одиназода Б.Н.// Материалы республиканской научн.–прак. конф. «Методы повышения качество и целесообразности процессов производства» посв. 20–летию независимости Республики Таджикистан и 50–летию МТФ, 2011. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2011. – С. 192–196.

251. Ганиев И.Н., Вахобов А.В, Джураев Т.Д. – Диаграмма состояния Ba–Al–Si: Жур. Изв. АН СССР, Металлы, 1978. – с. 247–250.

252. Каргаполова Т.Б., Махмадуллоев Х.А., Ганиев И.Н., Хакдодов М.М. Барий – новый модификатор силуминов // Литейное производство.– 2001. – № 9. – С. 62–64.

253. Jeffries Z. Chem and Metall. Engn. 1922, vol. 26, p. 750–752.

254. Chadwik G.A. Eutectic alloy solidification. – Progr. in mater. Scieence, 1963, vol. 12, № 2, p. 159–169.

255. Edwards J.D., Acher R.C. The new Aluminum – Silicon Alloys. – Chem. and Met.. Eng., 1924, № 31, – p. 504–505.

256. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1964. – 214 с., ил.

257. Бочвар А.А. Металловедение. – М.: Металлургиздат, 1956. – 414 с.

258. Фридляндер И.Н. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы. – М.: Оборонгиз, 1960. – 291 с.

259. Елагин В.И., Захаров В.В., Дриц А.М. Структура и свойства сплавов системы Al–Zn–Mg. М.: Металлургия, 1982. – 222 с.

260. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

261. Novikov J.J., Portnoy V.K. Terentieve T.E. – Acta Met., 1977, v. 25, № 10, p. 1139–1149.

262. Магниевые сплавы: справочник: в 2 ч. / под ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица и др. – М.: Металлургия, 1978. – Ч. 1. – 232 с.; Ч. 2. – 295 с.

263. Бодак О.И., Гладышевский Е.И. Тройные системы, содержащие редкоземельные металлы: справочник. – Львов: Вища школа, 1985. – 328 с.

264. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. – М.: Наука, 1975. – 272 с.

265. Скворцов А.И., Прохоров С.Г. Влияние алюминия на свойства демпфирующих сплавов цинк–алюминий // Демпфирующие металлические материалы: тезисы докладов 6-й Республиканской научно-технической конференции. – Киров: Кировский политехнический институт, 1991. – С. 102–105.

266. Курбанов Х.К., Хакдодов М.М., Курбанов Б. и др. Новый способ изготовления труб // Известия АН Таджикской ССР. – 1982. – № 4. – С. 103–108.

267. 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.

268. 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.

269. Хакдодов М.М. Разработка акустодемпфирующих композиционных материалов: монография. – Душанбе: НПИЦентр, 2001. – 153 с.

270. ГОСТ Р ИСО 45001–2020. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2020.

271. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2020.

272. Методика исследования процесса продольной прокатки высоких полос в скрещенных валках / Бринза В.В., Одиназода Б.Н., Раджабалиев С.С. // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2010. – С. 147–151.

273. ГОСТ Р 12.0.010–2009. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков. – М.: Стандартинформ, 2011.

274. ГОСТ 12.1.003–2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2015.

275. ГОСТ 12.1.012–2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2008.

276. ГОСТ ИСО 10112–2002. Материалы демпфирующие. Графическое представление комплексных модулей. – М.: Стандартинформ, 2002.

277. ГОСТ Р ИСО 18437–5–2014. Вибрация и удар. Определение динамических механических свойств вязкоупругих материалов. Часть 5. Сравнение между изгибными и сдвиговыми методами. – М.: Стандартинформ, 2015.

278. Обеспечение экологической безопасности при воздействии виброакустических факторов на производстве / Хакдод М.М., Одиназода Б.Н. // Водные ресурсы, энергетика и экология: научно-практический журнал Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. – 2023. – Т. 3, № 2. – Душанбе, 2023. – С. 146–153. – ISSN 2789–0953.

279. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

280. Файнбург Г. З. Методы оценки профессионального риска и их практическое применение // Безопасность и охрана труда. – 2020. – № 2(83), с. 25–41.

281. Файнбург Г. З. Метод Файна – Кинни и развитие рискометрии оценки профессионального риска // Безопасность и охрана труда. – 2022. – № 4, с.9–19.

282. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook. – Dearborn: Ford Motor Company, 2011.

283. IEC 61882:2016. Hazard and operability studies – Application guide. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.

284. Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety. Center for Chemical Process Safety / Energy Institute. – Wiley, 2018.

285. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

286. ILO–OSH 2001. Guidelines on occupational safety and health management systems. – Geneva: International Labour Office, 2001.

287. Железина Г.Ф, Колобков А.С., Кулагина Г.С. и др. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев органопластика, Труды ВИАМ, № 2(96), 2021, с. 10–19.

288. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И. и др. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов// Авиационные материалы и технологии, Труды ВИАМ, № 3, 2013, с. 3–11.

289. ASTM E756–05(2017). Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials. – West Conshohocken: ASTM International, 2017.

290. Исследование параметров перспективного гидромеханического привода горных машин с вращательным рабочим органом / Нажмудинов Ш.З., Одиназода Б.Н. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1 (69). – С. 79–83. – ISSN 2520–2227.

291. Проектирование конической фрикционной передачи с параллельными валами с обоснованием выбора материалов / Акрамов Б.Н., Одиназода Б.Н., Тошев М.А., Исматов И.А. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2022. – № 3 (59). – С. 56–61. – ISSN 2520–2227.

292. Методика расчёта технологических и энергосиловых параметров при прокатке в скрещенных валках / Одиназода Б.Н. // Политехнический вестник. Серия: Металлургия и материаловедение. – 2023. – № 2 (62). – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. – С. 95–98. – ISSN 2520–2227.

293. 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 материаловедение. – 2020. – № 2 (50). – С. 131–139. – ISSN 2520–2227.

294. 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. – 2020. – № 1–2 (5–6). – С. 120–127. – ISSN 2219–5408.

295. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Закон

Республики Таджикистан от 28 февраля 2004 года № 14 (с изменениями и дополнениями). – Душанбе, 2004.

296. Об обеспечении санитарно-эпидемиологической безопасности населения: Закон Республики Таджикистан от 8 декабря 2003 года № 49 (с изменениями и дополнениями). – Душанбе, 2003.

297. Об охране окружающей среды: Закон Республики Таджикистан от 2 августа 2011 года № 760 (с изменениями и дополнениями). – Душанбе, 2011.

298. 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.

299. 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.

300. 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.

301. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

Открытое Акционерное Общество

«Таджикская алюминиевая компания»

_____/ Шарифзода Шухрат Джурабой/

(подпись) (Ф.И.О.)

«22» 06 2026 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования

Мы, нижеподписавшиеся, представители **Открытое Акционерное Общество «Таджикская алюминиевая компания»,** составили настоящий акт о том, что в результате рассмотрения материалов диссертационной работы на тему: **«Научное обоснование и разработка методов и средств защиты от виброакустических факторов на промышленных предприятиях Таджикистана»** выполненной **Одиназода Бозорали Неъматом** на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.9.1 «Охрана труда», установлено, что результаты исследования могут быть использованы (внедрены) в практическую деятельность служб охраны труда промышленных предприятий, в научно-исследовательских учреждениях, а также в учебном процессе высших учебных заведений, осуществляющих подготовку кадров в области безопасности жизнедеятельности и экологии.

В практическую деятельность внедрены следующие результаты:

1. **Экспериментально установленные виброакустодемпфирующие свойства литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, а также многослойных композиционных материалов на их основе**, включая выявленные механизмы рассеивания энергии колебаний в зависимости от физико-механических и технологических свойств материала. Результаты служат научно-

технической базой для проектирования конструкций с пониженным уровнем виброакустического излучения.

2. **Модель соударения деталей машин и механизмов транспортного рольганга,** описывающая процесс формирования виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения на реальных производственных конструкциях. Может быть применена при анализе и прогнозировании уровней виброакустических факторов в металлургическом и горнорудном производстве.

3. **Методический подход к оценке виброакустического риска на рабочих местах промышленных предприятий и модель совершенствования системы управления охраной труда** на основе риск-ориентированного управления виброакустическими факторами. Предназначен для использования службами охраны труда при оценке условий труда и разработке профилактических мероприятий.

4. **Устройство для снижения виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения**, защищённое двумя малыми патентами Республики Таджикистан на изобретения, — в качестве конструктивного инженерного средства защиты от виброакустических факторов в производственных условиях.

5. **Рекомендации по применению виброакустодемпфирующих материалов на основе алюминиевых сплавов в качестве инженерного средства защиты** непосредственно в источнике возникновения виброакустических факторов. Предназначены для машиностроительных, горнорудных и металлургических предприятий Таджикистана.

Использование указанных результатов позволяет:

– использовать систематизированные данные о виброакустодемпфирующих характеристиках алюминиевых сплавов и многослойных композиционных материалов при проектировании оборудования с пониженным уровнем шума и вибрации;

– применять разработанный методический подход к оценке виброакустического риска на рабочих местах в рамках риск-ориентированной системы управления охраной труда на промышленных предприятиях;

– использовать модель рольганга для прогнозирования и снижения уровней виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения при проектировании и реконструкции систем транспортировки материалов;

– снизить уровни шума и вибрации на рабочих местах за счёт применения запатентованного устройства и виброакустодемпфирующих материалов из алюминиевых сплавов, что способствует уменьшению рисков возникновения профессиональных заболеваний работников.

Представители ОАО «Таджикская алюминиевая компания»:

Директор по экономике и персоналу Должность	 Подпись	Дик П.И. Ф.И.О
Директор по охране труда, экологии и качеству Должность	 Подпись	Абдуллоев А.С. Ф.И.О.

Дата: «_____» _____ 2026 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11, Факс: (+992 37) 221-71-35
Web: *www.ttu.tj* ***E-mail:*** *info@ttu.tj*

от «24» 07 2026г. № 27/581

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ТТУ им. ак. М.С. Осими
д.э.н. профессор Давлатзода К.К.
_____
«_____2026г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Одиназода Бозорали Неъмат в учебный процесс кафедр «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», «Технология машиностроения», «Металлургия» и «БЖД и Э» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации докторской диссертации на тему: **«Научное обоснование и разработка методов и средств защиты от виброакустических факторов на промышленных предприятиях Таджикистана»** выполненной **Одиназода Бозорали Неъматом** на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.9.1. Охрана труда, внедрены в учебный процесс кафедр «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», «Технология машиностроения», «Металлургия» и «БЖД и Э», при изучении дисциплин: «Безопасность жизнедеятельности», «Основы металлургического производства», «Оборудования металлургических процессов», «Металлургия цветных металлов» и

«Обработка металлов давлением», при подготовке бакалавров и магистрантов по специальностям 1-3601- машиностроение, 1-360201-05-металлургические машины и оборудования, 1-4201010104-металлургия цветных металлов, 1-4201010101-литейное производство черных и цветных металлов.

Эффект от внедрения результатов научной работы:

Научно обоснованна и стандартизирована методика для экспериментального определения виброакустодемпфирующих свойств конструкционных материалов в исследовательских лабораториях и в учебном процессе университета; можно использовать систематизированные данные о виброакустодемпфирующих характеристиках алюминиевых сплавов и многослойных композиционных материалах при проектировании оборудования с пониженным уровнем шума и вибрации; использовать модель рольганга для прогнозирования и снижения уровней виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения при проектировании и реконструкции систем транспортировки материалов.

На основании выполненных исследований разработан:

– Ролик рольганга. Малый патент №TJ 1535, зарегистрирован 20.09.2024 г.

– Установка для исследования акустодемпфириющих свойств металлических материалов. Малый патент №TJ 1553, зарегистрировано 11.11.2024 г.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:

Первый проректор,
проректор по учебной работе, к.т.н., доцент _____ Маджидзода Т.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник учебного управления _____ Рахимзода Дж.Б.

Начальник управления науки и инновации _____ Бозоров Ш.А.

Декан механико-технологического факультета _____ Исмонзода Р.Д.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ДФ НИТУ МИСИС
_____ /М.А. Джураев/
«19» 06 2026 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования

Мы, нижеподписавшиеся, представители Душанбинского филиала НИТУ МИСИС, составили настоящий акт о том, что по результатам рассмотрения материалов диссертационной работы на тему: «Научное обоснование и разработка методов и средств защиты от виброакустических факторов на промышленных предприятиях Таджикистана», выполненной Одиназода Бозорали Неъматом на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.9.1 Охрана труда, установлено, что результаты исследования могут быть использованы в образовательном процессе кафедры «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии» при преподавании дисциплин «Безопасность жизнедеятельности», «Основы металлургического производства», «Оборудование металлургических процессов», «Металлургия цветных металлов» и других профильных дисциплин.

В учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность внедрены следующие результаты исследования:

1. Методика исследования виброакустодемпфирующих свойств металлов и сплавов, моделирующая процесс звукоизлучения при соударении деталей машин и механизмов. Методика рекомендуется к использованию при выполнении научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе при подготовке специалистов инженерно-технического профиля.

2. Экспериментально установленные виброакустодемпфирующие свойства литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, а также многослойных композиционных материалов на их основе, включая выявленные

механизмы рассеивания энергии колебаний в зависимости от физико-механических и технологических свойств материала. Полученные результаты могут служить научно-технической основой при проектировании конструкций и оборудования с пониженным уровнем виброакустического воздействия.

3. Устройство для снижения виброакустических факторов ударно-вибрационного происхождения, защищённое двумя малыми патентами Республики Таджикистан на изобретения, рекомендовано к использованию в качестве инженерного средства защиты от воздействия виброакустических факторов в производственных условиях.

Использование указанных результатов позволяет:

– применять научно-обоснованную методику для экспериментального определения виброакустодемпфирующих свойств конструкционных материалов в исследовательских лабораториях и в учебном процессе нашего филиала;

– использовать экспериментально подтверждённые данные о виброакустодемпфирующих характеристиках алюминиевых сплавов и многослойных композиционных материалов при проектировании оборудования с пониженным уровнем шума и вибрации;

– использовать разработанную модель рольганга для прогнозирования уровней виброакустического воздействия и разработки мероприятий по их снижению при проектировании и модернизации транспортных систем.

От ДФ НИТУ МИСИС:

Заместитель директора по науке и инновациям, кандидат технических наук, доцент _____ Бобоев И.Р.

Начальник учебно-методического отдела, доктор технических наук, и.о. профессора _____ Махмадизода М.М.

Дата: «16» 06 2026 г.

ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

ИДОРАИ ПАТЕНТӢ

ШАҲОДАТНОМА

Шаҳрванд Одиназода Бозорали Неъмат

муаллифи ихтироъ *Ролики ролгинг*

Ба ихтироъ нахустпатенти № TJ 1535 **дода шудааст.**

Дорандаи нахустпатент Ҳақлод Маҳмадпариф Маҳмуд; Одиназода Бозорали Неъмат

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Хаммуаллиф(он) Ҳақлод Маҳмадпариф Маҳмуд

Аввалияти ихтироъ 23.10.2023

Гаҳрихи рӯзи пешниҳоди ариза 23.10.2023

Аризаи № 2301896

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

20 сентябри с. 2024 **ба қайд гирифта шуд**

Нахустпатент эътибор дорад аз 23 октябри с. 2024 **то** 23 октябри 2034 **с.**

Ин шаҳодатнома ҳангоми амали гардонидани ҳуқуқу имтиёзҳое, ки бароии муаллифони ихтироот бо қонунгузории ҷорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР Исмоилзода М.Х.

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН
ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

УДОСТОВЕРЕНИЕ

Гражданин Одиназода Бозорали Неъмат

Является автором изобретения Ролик рольганга

На изобретение выдан малый патент №TJ 1535

Патентообладатель Хакдод Махмадшариф Махмуд; Одиназода Бозорали Неъмат

Страна Республика Таджикистан

Соавторы Хакдод Махмадшариф Махмуд

Приоритет изобретения 23.10.2023

Дата подачи заявления 23.10.2023

Заявление № 2301896

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан 20 сентября 2024

Малый Патент действителен с 23 октября 2024 г. по 23 октября 2034 г.

Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот, установленных действующим законодательством

РАЁСАТИ ФЕҲРИСТҲОИ ДАВЛАТӢ ВА НАШРИЁТ

Республика Таджикистан

(19) TJ (11) 1535
(51) МПК B65G 39/00

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

(12) Описание изобретения

К МАЛОМУ ПАТЕНТУ

1

(21) 2301896
(22) 23.10.2023
(46) Бюл. 211, 2024
(71) Хакдод Махмадшариф Махмуд; Одиназода Бозорали Неъмат (TJ)
(72) Хакдод Махмадшариф Махмуд; Одиназода Бозорали Неъмат (TJ)
(73) Хакдод Махмадшариф Махмуд; Одиназода Бозорали Неъмат (TJ)

(54) **РОЛИК РОЛЬГАНГА**

1. **(56)** Бринза В. Н., Зарапин Ю.Л. и др. Ролик рольганга, преимушественно прокатного стана. А.с. СССР №638392 от 25.12.78., Бюлетень 47, 1978 г.

2. Буря А.И., Буря А.А., Попов Н.Я. и др. Ролик рольганга. Патент Украины № 95062854, Бюллетень № 7, 2001 г

3. Акустодемпфирующий материал из сплавов алюминия. Малый патент Республики Таджикистан №0700157 от 11.12.2007, Tj 117, Бюлетень № 49.

2

(57) Изобретение относится к конструкции оборудования для транспортировки металлических изделий, преимущественно ролика рольганга для снижения производственного шума.

Сущность изобретения заключается в том, что ролик изготовлена из стального материала, которая состоит из наружной части ролика, промежуточного слоя из акустодемпфирующего материала и внутренней части ролика. Предлагаемый ролик обеспечивает эффективность снижения шума проката при транспортировке и повышения долговечности бочку из стальной основы.

ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

ИДОРАИ ПАТЕНТӢ

ШАҲОДАТНОМА

Шаҳрванд Одиназода Бозорали Неъмат

муаллифи ихтироъ *Дастгоҳ барои таҳқиқ намудани хосиятҳои демпферии масолеҳҳои металлӣ*

Ба ихтироъ нахустпатенти № TJ 1553 **дода шудааст.**

Дорандаи нахустпатент Ҳакдод Маҳмадшариф Маҳмуд, Одиназода Бозорали Неъмат, Бозоров Шамсуддин Аломуддинович

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Ҳаммуаллиф(он) Ҳакдод Маҳмадшариф Маҳмуд, Бозоров Шамсуддин Аломуддинович

Аввалияти ихтироъ 18.08.2023

Таърихи рузи пешниҳоди ариза 18.08.2023

Аризаи № 2301874

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

11 ноябри с. 2024 **ба кайд гирифта шуд**

Нахустпатент эътибор дорад аз 18 августи с. 2023 **то** 18 августи 2033 **с.**

Ин шаҳодатнома ҳангоми амалӣ гардонидани ҳуқуқу имтиёзҳое, ки барои муаллифони ихтироот бо қонунгузории ҷорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад

ДИРЕКТОР Исмоилзода М.Ҳ.

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН

ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

УДОСТОВЕРЕНИЕ

Гражданин **Одиназода Бозорали Неъмат**

Является автором изобретения **Установка для исследования акустодемпфирующих свойств металлических материалов**

На изобретение выдан малый патент №TJ 1553

Патентообладатель Хакдод Махмадшариф Махмуд, Одиназода Бозорали Неъмат, Бозоров Шамсуддин Аломуддинович

Страна Республика Таджикистан

Соавторы Хакдод Махмадшариф Махмуд, Бозоров Шамсуддин Аломуддинович

Приоритет изобретения 18.08.2023

Дата подачи заявления 18.08.2023

Заявление № 2301874

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан 11 ноября 2024

Малый Патент действителен с 18 августа 2023 г. по 18 августа 2033 г.

Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот, установленных действующим законодательством

РАЁСАТИ ФЕҲРИСТҲОИ ДАВЛАТӢ ВА НАШРИЁТ

(19) TJ (11) 1553
(51) МПК G01H1/00

Республика Таджикистан

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

(12) Описание изобретения

К МАЛОМУ ПАТЕНТУ

1

(21) 2301874
(22) 18.08.2023
(46) Бюл. 213, 2024
(71) Хакдод Махмадшариф Махмуд (TJ), Одиназода Бозорали Неъмат (TJ), Бозоров Шамсуддин Аломуддинович (TJ)
(72) Хакдод Махмадшариф Махмуд (TJ), Одиназода Бозорали Неъмат (TJ), Бозоров Шамсуддин Аломуддинович (TJ)
(73 Хакдод Махмадшариф Махмуд (TJ), Одиназода Бозорали Неъмат (TJ), Бозоров Шамсуддин Аломуддинович (TJ)
(54) **УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

(56)

1. Утепов Е.Б., Хохлов П.П. и др. Разработка малошумных сплавов. - Алматы, 1998. Установка для исследования скорости / затухания звука УДИСЗ-1, 112 стр.
2. Малый патент Республики Таджикистан TJ № 119

Изобретение относится к области физики, а именно к устройствам и приборам по исследованию акустодемпфирующих свойств металлических материалов.

2

Установка состоит из основания, закрепленных на стойках подвижной и неподвижной плиты, на которой установлен образец посредством вольфрамовых нитей. Сверху подвижной плиты установлена трубчатая печь с бункером для нагрева шарика, а снизу - верхний и нижний электромагниты. К стойкам, сверху и снизу неподвижной плиты, прикреплены по одному нагревательному элементу, ниже которых прикреплены соответственно микрофон, подсоединенный к панели акустоизмерительных приборов, ловитель (приемник) шариков и прибор для измерения температуры. На неподвижной плите установлена регулируемая плита для закрепления образца на вольфрамовых нитях при помощи подвижных захватов и содержащая шлицевое соединение, обеспечивающее наклон образца под разными углами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

1.	«ДОЧЕРНЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА», Г. БУСТОН
2.	ГУП «РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ ТАДЖИКИСТАНА», Г. БУСТОН
3.	СП «ТАМЕКО», Г. БУСТОН
4.	ООО «АЛМОСИ ДУРАХШ», Г. ВАХДАТ
5.	ООО «АЛЮМИН ПРОФ», Г. ТУРСУНЗАДЕ
6.	ООО «АЪЛО СИФАТ», Г. БУСТОН
7.	ООО «БАХОРИ БУСТОН», Г. БУСТОН
8.	ООО «ГАНДЖОФАР», Г. БУСТОН
9.	ООО «ДУНЁИ СИМИН», Г. ДУШАНБЕ
10.	ООО «КОМПОЗИТ Т.А.», Г. ДУШАНБЕ
11.	ООО «МЕЛИКШОХ», Г. ГИССАР
12.	ООО «МУХАМАДДЖОН ВА САФИЯ», Г. ДУШАНБЕ
13.	ООО «НОКИЛХОИ БАРКИИ ГУЛИСТОН», Г. ГУЛИСТОН
14.	ООО «ОХАНКОР», Г. ХУДЖАНД
15.	ООО «ПУЛИ ЗАРИН», Г. ДУШАНБЕ
16.	ООО «ПУЛОДИ АСЛ», Г. ДУШАНБЕ
17.	ООО «РАХИМОВ АЛИДЖОН», Г. ДУШАНБЕ
18.	ООО «РУСТАМ ЮНУСОВ», Р-Н Б. ГАФУРОВА
19.	ООО «САИДЗОДА САИДМУРОД», Р-Н Б. ГАФУРОВА
20.	ООО «СИМИ СТАНДАРТ», Г. ИСТАРАВШАН
21.	ООО «СИТОРА ГУРУХ», Г. ДУШАНБЕ
22.	ООО «СИФАТ ПЛАСТИК», Г. ВАХДАТ
23.	ООО «СИФАТПЛАСТ», Г. Б. ГАФУРОВ
24.	ООО «СУБХИ САФО», Г. ХУДЖАНД
25.	ООО «СУГД МЕТАЛЛ», Р-Н Б. ГАФУРОВА
26.	ООО «ТАЛКО КЕМИКАЛ», ЯВАНСКИЙ Р-Н
27.	ООО «УСМОН 2015», Г. ДУШАНБЕ
28.	ООО «ХАКИМИ ДУРАНДЕШ», МАТЧИНСКИЙ Р-Н
29.	ООО «ДЖАВОХИРОТИ ЗАРГАРИИ ЗАРАФШОН», Г. ДУШАНБЕ
30.	ООО «ШУКУРУ ШАРИФ», ДЖАЙХУНСКИЙ Р-Н
31.	ООО «НУРБАХШИ СУГД», Г. БУСТОН
32.	ООО «РАХМАТЗОДА АМОН», Г. БУСТОН
33.	ООО «СИМИН СОХТМОН»
34.	ООО «ТОДЖ ПЛАСТ», Г. БУСТОН
35.	ОАО «ЛЕНИНАБАДСКИЙ КОМБИНАТ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ», Г. ГУЛИСТОН
36.	ОАО «ТАМОХУШ», Г. ИСФАРА
37.	ОАО «ХУМО», Г. ДУШАНБЕ
38.	ЗАО «НОКИЛИ ТУРСУНЗОДА», ТУРСУНЗАДЕ
39.	ВМ, ООО «ХОДЖИ ШАРИФ», Г. ГИССАР

40.	ГУП «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ» И ГУП «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД», Г. ДУШАНБЕ
41.	ДОЧЕРНЕЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛЮМИНСОХТМОН», Г. ТУРСУНЗАДЕ
42.	РСБ ООО «ДУРАХШ-К», Г. ДУШАНБЕ
43.	РСБ ЗАО «ТАДЖИКСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ», ВАНЧСКИЙ Р-Н
44.	ФИЛИАЛ ОАО «ТАДЖИКГИДРОМОНТАЖ», Г. НУРЕК
45.	ЧДД «ТИДЖОРАТ АБУБАКР», Г. ГИССАР
46.	ООО «АБДУРАХМОНИ БУНЁД», ФАРХОРСКИЙ Р-Н
47.	ООО «АВТОВОДИТЕЛЬ», Г. ДУШАНБЕ
48.	ООО «АДИС 98», ШУГНАНСКИЙ Р-Н
49.	ООО «АЛИ БУХОРИ», Г. ТУРСУНЗАДЕ (ПРОИЗВОДСТВО № 3)
50.	ООО «АЛКОН ДУШАНБЕ», Г. ДУШАНБЕ
51.	ООО «АЛЮМИНИЙИ АВВАЛИН», Г. ТУРСУНЗАДЕ
52.	ООО «АЛЮМИНСОЗ»
53.	ООО «АНАС ОДИНА», Г. ГИССАР
54.	ООО «АСОЗОДА», НУРАБАДСКИЙ Р-Н
55.	ООО «АССО», Г. ДУШАНБЕ
56.	ООО «БАХОДУР-90» (КХ), Р-Н ДЖ. БАЛХИ
57.	ООО «БОБОЕВ АЗАМДЖОН», Г. ДУШАНБЕ
58.	ООО «БОЗСОЗ», Г. ТУРСУНЗАДЕ
59.	ООО «БООМПУШИ ХИСОР», Г. ГИССАР
60.	ООО «ДАВЛАТБИ», Р-Н РУДАКИ
61.	ООО «ДАВЛАТИ ШУХРАТ», Г. ГИССАР
62.	ООО «ДАВЛАТОВ БАХОДУР», Г. ДУШАНБЕ
63.	ООО «ДАВРОНИ СУЛХ», Р-Н РУДАКИ
64.	ООО «ДЖИН ЧЕН», СПИТАМЕНСКИЙ Р-Н
65.	ООО «ДОРВИН ПЛАСТ», Г. ТУРСУНЗАДЕ
66.	ООО «ДУШАНБЕ ФУЛУЗОТ», ДУШАНБЕ
67.	ООО «ЗИНИРА», Г. ДУШАНБЕ
68.	ООО «ИДРИСИ АСР», Г. ДУШАНБЕ
69.	ООО «ИКДОМИ КАНД», КАНИБАДАМ
70.	ООО «ИКЛИМ», Г. КУЛЯБ
71.	ООО «ИМОН ПЛАСТ», Г. ХУДЖАНД
72.	ООО «ИМПЕРИЯ ОКОН» (КХ), Г. БОХТАР
73.	ООО «ИМРОН ХИЗМАТРАСОН», Г. ДУШАНБЕ
74.	ООО «ИСКАНДАР-14», Р-Н Б. ГАФУРОВА
75.	ООО «ИСРОИЛИ АБДУЛЛО» (КХ), Г. БОХТАР
76.	ООО «ИСТЕХСОЛИ МУКАММАЛ», Г. ДУШАНБЕ
77.	ООО «КИШВАРИ АБДУЛЛО», Г. ДУШАНБЕ
78.	ООО «КОКО», Г. ДУШАНБЕ
79.	ООО «КОРХОНАИ ХУРДИ ИСТЕХСОЛИ ШАМСУЛЛО», Г. ВАХДАТ
80.	ООО «КОШОНА ГРУПП», Г. ХУДЖАНД
81.	ООО «МАРВ СОХТМОН», Г. ДУШАНБЕ
82.	ООО «МАСНУОТИ ФИЛИЗИ»

83.	ООО «МАХДИ-2013», Г. ДУШАНБЕ
84.	ООО «МАХМУД-КО», Г. ГУЛИСТОН
85.	ООО «МАХСУЛОТХОИ ИБРОХИМДЖОН», Г. ВАХДАТ
86.	ООО «МАХСУЛОТХОИ ФИЛИЗИ», Г. ВАХДАТ
87.	ООО «МАХСУЛОТХОИ ФИЛИЗИИ ВАХДАТ», Г. ВАХДАТ
88.	ООО «МАШКУР», Г. ДУШАНБЕ
89.	ООО «МУАД», ИСТАРАВШАН
90.	ООО «НИНДЭ», Г. ДУШАНБЕ
91.	ООО «НОВОПЛАСТ», СПИТАМЕНСКИЙ Р-Н
92.	ООО «НУРИ РОХНАМО», Г. ДУШАНБЕ
93.	ООО «ОЗОДАЛИ», АШТСКИЙ Р-Н
94.	ООО «ОХАН», Г. ДУШАНБЕ
95.	ООО «ОХАНГАРИ КОБИЛ», Р-Н РУДАКИ
96.	ООО «ОХАНГУДОЗИИ ТОДЖИКИСТОН», Р-Н РУДАКИ
97.	ООО «ОХАНСАРОЙ», Г. ХОРОГ
98.	ООО «ПАЙКИ ХУНАР», Г. ХОРОГ
99.	ООО «ПАНДЖ ПАНДЖА»
100.	ООО «РАВЗАНА ПЛАСТИК», Г. ХУДЖАНД
101.	ООО «РАХШОН», Г. ИСТАРАВШАН
102.	ООО «РЕМСТРОЙДОРМАШ», Г. ДУШАНБЕ
103.	ООО «РОМ-СТАР», Г. ТУРСУНЗАДЕ
104.	ООО «РУСТАМ ВА С», Г. ДУШАНБЕ
105.	ООО «РУШД-МОХИЯТИ ХАЁТ», Г. ХОРОГ
106.	ООО «САБР», ЯВАНСКИЙ Р-Н
107.	ООО «СИМКОР», Г. ДУШАНБЕ
108.	ООО «СИМРОН», Г. ДУШАНБЕ
109.	ООО «СИТОРАИ АСР», Г. ХУДЖАНД
110.	ООО «СОБИРОВ Б.Г.», Г. ДУШАНБЕ
111.	ООО «СОЗАНДА 2013», Г. ТУРСУНЗАДЕ
112.	ООО «СОЗМОН ГДТ», КАНИБАДАМ
113.	ООО «СОЗМОН», Г. ДУШАНБЕ
114.	ООО «СОМОНШИФЕР», Г. ДУШАНБЕ
115.	ООО «СОРБОН ПЛАСТ», МАТЧА
116.	ООО «СУГД НУРПЛАСТ», ИСТАРАВШАН
117.	ООО «СУГДПЛАСТИК», Р-Н Б. ГАФУРОВА
118.	ООО «ТАДЖИК КЛИМАТ», Р-Н РУДАКИ
119.	ООО «ТАЛКО ПРОФИЛЬ», Г. ТУРСУНЗАДЕ
120.	ООО «ТЕХМАШ», Г. ЛЕВАКАНТ
121.	ООО «ТЕХНОЛОГИЯ ВА СОХТМОНИ ЗАМОНАВИ», Г. ДУШАНБЕ
122.	ООО «ТИЕНГ ЛОНГ», Г. Б. ГАФУРОВ
123.	ООО «ТОСАЛ», Г. ДУШАНБЕ
124.	ООО «ТОДЖФИЛИЗ», Г. БУСТОН
125.	ООО «УМАР СИФАТ», Г. ДУШАНБЕ
126.	ООО «УСМОН-2016», РАШТ
127.	ООО «ФАЗОИ САФОБАХШ», Г. ДУШАНБЕ
128.	ООО «ФАЙЗ 777», Г. ГУЛИСТОН

129.	ООО «ФАЙЗИ ГАЧ», ЯВАНСКИЙ Р-Н
130.	ООО «ФАЙЗИ ИСТЕЪДОД», Г. ГИССАР
131.	ООО «ФАЙЗИ ХОНА», МАТЧА
132.	ООО «ФАРХУНДАИ БАХОР» (КХ), Р-Н ДЖ. БАЛХИ
133.	ООО «ХАДИД ГУРУХ», Г. ДУШАНБЕ
134.	ООО «ХАДИД», Р-Н ИСТАРАВШАН
135.	ООО «ХАЙРИ БАХРОМ», Г. ДУШАНБЕ
136.	ООО «ХМБ ДУСТИ» (КХ), ДЖАЙХУНСКИЙ Р-Н
137.	ООО «ХОДЖИ ШАРИФ», Г. ДУШАНБЕ
138.	ООО «ЧУЯНДОЗ», Г. ДУШАНБЕ
139.	ООО «ШАКАРБЕК», ИШКАШИМСКИЙ Р-Н
140.	ООО «ШАРАФДЖОНИ КАРИМДЖОН», Р-Н ДЖАББОРА РАСУЛОВА
141.	ООО «ШАХЗАД ХУРРАМ АЛЮМИНИЙ», Р-Н РУДАКИ
142.	ООО «ШЕРАФГАН СИРОДЖ», Г. ДУШАНБЕ
143.	ООО «ШИРКАТИ МОШИНСОЗИИ ТЕХНОЛОГИЯХОИ МУОСИР», Г. ДУШАНБЕ
144.	ООО «ШОНЛАЙН», Г. ХУДЖАНД
145.	ООО «ЭХЁИ ФУЛУЗОТ», Г. ДУШАНБЕ
146.	ООО КМТТ «ТАДЖПРОФ», Г. ХУДЖАНД
147.	ООО КФ «ДУСТИ АМИРХОН», Г. ХУДЖАНД
148.	ООО «МУХАММАДЖОНИ НАВРУЗ», Г. ГИССАР
149.	ООО «ПАЙДО», Г. ДУШАНБЕ
150.	ООО «ШИРКАТИ ТИДЖОРАТИИ ШУРОБ ИСФАРА»
151.	ООО «АЗИЗИ САИД», Р-Н РУДАКИ
152.	ООО «АСЛИДДИНИ МАРЯМ», Р-Н РУДАКИ
153.	ООО «АЮБИ ФАРРУХ», ГИССАРСКИЙ Р-Н
154.	ООО «ГОЛИБХУДЖА», Р-Н РУДАКИ
155.	ООО «ДИЛНАВО», Р-Н РУДАКИ
156.	ООО «ИКРОМИЁН», Г. КУЛЯБ
157.	ООО «ИРОДАИ ХАЛИФ», Р-Н РУДАКИ
158.	ООО «МАВОДИ БА ФАРСУДАШАВИ ТОБОВАР», Г. ПЕНДЖИКЕНТ
159.	ООО «ОСИЯИ ИДРИС», Р-Н РУДАКИ
160.	ООО «САХМИ АМИР», Р-Н ИСТАРАВШАН
161.	ООО «ДЖАЛОЛИДДИНИ ОЛОВИДДИН», Р-Н РУДАКИ
162.	ООО «ШАРИФОВХО», ФАРХОРСКИЙ Р-Н
163.	СП ЗАО «СУПЕРПЛАСТ ПЛЮС», Г. ВАХДАТ
164.	ЗАО «НОРД АЗИЯ МЕТАЛЛ», СПИТАМЕНСКИЙ Р-Н
165.	ВМ ФИЛИАЛ ООО «С.А. МИНЕРАЛЗ», МУРГАБСКИЙ Р-Н
166.	ВМ ООО «СОВМЕСТНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ТАКОМ ГОЛД», САНГВОРСКИЙ Р-Н
167.	ВМ ООО «ВЕН-ДЗЯН», Г. ВАХДАТ
168.	ВМ ООО «ДАСТРАС 2011», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
169.	ВМ ООО «ЗАРИНК», САНГВОРСКИЙ Р-Н
170.	ВМ, ООО «БОГБУНЁД», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
171.	РСБ, ООО «ТВЕА ДУШАНБЕ САНОАТИ КУХИ», АЙНИНСКИЙ Р-Н
172.	ФИЛИАЛ ООО «БАРАКАТИ ИСТИКЛОЛ», ШУРОАБАДСКИЙ Р-Н

173.	ООО «БУРДЖИ МЕРОС», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
174.	ООО «АРБ МИНЕРАЛС ГРУПП», АЙНИНСКИЙ Р-Н
175.	ООО «АТОРУД ЗАР», Г. ДУШАНБЕ
176.	ООО «ГАНИМАТИ ГАНЧ», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
177.	ООО «ГАНДЖ», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
178.	ООО «ГАНЧИ АФРОЗ», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
179.	ООО «ГАНЧИ ГУЛИСТОН», Г. ДУШАНБЕ
180.	ООО «ГАНЧИ ЁКУБДЖОН», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
181.	ООО «ГАНЧИ ИМРОН», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
182.	ООО «ГАНЧИ ОДИНА», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
183.	ООО «ГАНЧИ РАХМОНИЁН», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
184.	ООО «ГАНЧИНАИ КУХСОР»
185.	ООО «ГУЛИ МУРОД», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
186.	ООО «ДАШТИ ХОВАЛИНГ», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
187.	ООО «ЗАРШОД», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
188.	ООО «ИСРОИЛ 11», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н (ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПРИОСТАНОВЛЕНА)
189.	ООО «НАЗИРИ», ШУРОАБАДСКИЙ Р-Н
190.	ООО «НАХШ», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
191.	ООО «НУКРАФОМ», Р-Н Б. ГАФУРОВА
192.	ООО «РУШДИ ЛАХШ», ЛАХШСКИЙ Р-Н
193.	ООО «САНОАТ ВА МАЪДАН», Г. ДУШАНБЕ
194.	ООО «СОЮЗ ЗАР», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
195.	ООО «ШИМШО», ДАРВАЗСКИЙ Р-Н
196.	ООО «ШИРКАТИ КУХИ САНОАТИИ ТОДЖИКИСТОНУ ХИТОЙ», Г. ГУЛИСТОН
197.	ООО «ШИРКАТИ МЕТАЛЛУРГИИ АНЗОБ», АЙНИНСКИЙ Р-Н
198.	ООО СП «ТАКОМ ГОЛД», ДАРВАЗСКИЙ Р-Н
199.	ООО ТАКХ «АНЗОБ», АЙНИНСКИЙ Р-Н
200.	ООО «ЗАЙФУЛЛО», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
201.	ТАДЖИКСКО-КАНАДСКОЕ СП ООО «АПРЕЛЕВКА», Г. ГУЛИСТОН
202.	ООО «АВЕСТО ОДИНА», ХОВАЛИНГСКИЙ Р-Н
203.	ОАО «АДРАСМАНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ», Г. ГУЛИСТОН
204.	ЗАО «ТАЛКО ГОЛД», АЙНИНСКИЙ Р-Н
205.	ООО «ШИМШО», ДАРВАЗСКИЙ Р-Н
206.	ООО «ШИРКАТИ КУХИ САНОАТИИ ТОДЖИКИСТОНУ ХИТОЙ», Г. ГУЛИСТОН
207.	ЗАО «ТАЛКО ГОЛД», АЙНИНСКИЙ Р-Н

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

I. ДОКУМЕНТЫ ОБЩИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

1. ГОСТ 24525.0—80. Управление производственным объединением и промышленным предприятием. Основные положения.

2. ГОСТ 12.0.001—82 (СТ СЭВ 829—77). ССБТ. Основные положения.

3. ГОСТ 12.0.002—80 (СТ СЭВ 1084—78). ССБТ. Термины и определения.

4. ГОСТ 12.0.003—74 (СТ СЭВ 790—77). ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

5. Типовое положение об отделе (бюро) охраны труда (техника безопасности) предприятия, организации, утверждено Госкомтрудом СССР и ВЦСПС 29.04.82.

6. РД 50-134—78. Методические указания по контролю полноты изложения требований безопасности труда в конструкторской и технологической документации.

7. Рекомендации по разработке стандартов предприятия по безопасности труда, утверждены техническим управлением Госстандарта и отделом охраны труда ВЦСПС 17.03.80.

8. РДМУ 83-82. Методические указания по внедрению стандартов Системы стандартов безопасности труда в отраслях народного хозяйства (взамен РДМУ 83-76).

9. РДМУ 86-77. Методические указания по государственному надзору за внедрением и соблюдением стандартов ССБТ.

10. Правила, нормы, инструкции, указания, положения, утвержденные органами государственного надзора, министерствами (ведомствами).

II. ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

1. Рекомендации по разработке комплексных планов улучшения условий, охраны труда и санитарно-оздоровительных мероприятий.

2. Положение о порядке заключения коллективных договоров.

3. Номенклатура мероприятий по охране труда.

III. КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОХРАНЫ ТРУДА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ системы управления охраной труда (СУОТ)

1. Рекомендации об организации ведомственного контроля за внедрением и соблюдением стандартов безопасности труда, утверждены Госстандартом.

2. Положение о технической инспекции труда.

3. Положение о правовой инспекции труда.

4. Положение по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору (Госгортехнадзор).

5. Положение о комиссии охраны труда профсоюзного комитета.

6. Положение об общественном инспекторе по охране труда.

7. ГОСТ 1.25—76. «ГСС. Метрологическое обеспечение. Основные положения».

8. Методические указания по организации работы ведомственных метрологических служб в области безопасности труда.

9. Методические рекомендации об организации трехступенчатого контроля за состоянием охраны труда.

IV. УЧЕТ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУОТ

1. Положение о расследовании и учете несчастных случаев на производстве.

2. Типовой паспорт санитарно-технического состояния условий труда в цехе.

3. Типовое положение о санитарной лаборатории на промышленном предприятии, утверждено Минздравом.

V. ОБУЧЕНИЕ РАБОТАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА И ПРОПАГАНДА ВОПРОСОВ ОХРАНЫ ТРУДА

1. ГОСТ 12.0.004—79. ССТБ. Организация обучения работающих безопасности труда. Общие положения.

2. Типовое положение о кабинете охраны труда.

3. Типовое положение о порядке проверки знаний правил, норм, инструкций по технике безопасности руководящими и инженерно-техническими работниками, утверждено Госгортехнадзором.

4. Об аттестации персонала, обслуживающего объекты котлонадзора и подъемные сооружения, и мерах по повышению качества его подготовки и обучения, утверждено постановлением Госгортехнадзора.

5. Типовое положение о профессиональном обучении рабочих на производстве.

6. Методические рекомендации по организации пропаганды в области охраны труда.

7. Методические рекомендации по применению плакатов по охране труда на предприятиях, одобрены Методическим советом по выпуску печатной продукции по вопросам охраны труда.

8. Методические рекомендации по оформлению информационного стенда «Охрана труда».

VI. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1. ГОСТ 12.2.003—74 (СТ СЭВ 1085—78). «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности».

2. ГОСТ 12.2.049—80. «ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования».

3. СНиП III-31—78. Правила производства и приемки работ. Технологическое оборудование. Основные положения.

4. ГОСТ 1.26—77. «ГСС. Порядок разработки и согласования требований безопасности в стандартах и технических условиях».

5. ГОСТ 15.001—73. «Система разработки и постановка продукции на производство. Основные положения».

6. РД 50-Ш—81. Методические указания о порядке согласования проектов стандартов и технических условий с профсоюзными органами.

7. Методические указания по проверке проектов стандартов и технических условий на полноту изложения требований безопасности труда, утверждены техническим управлением Госстандарта, отделом охраны труда, санитарно-эпидемиологическим управлением Минздрава.

8. Методические указания по присвоению производственному оборудованию Знака безопасности, утверждены техническим управлением Госстандарта и отделом охраны труда ВЦСПС в августе 1982 г.

9. Государственные и отраслевые стандарты безопасности труда но видам производственного оборудования.

VII. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

1. ГОСТ 12.3.002—75 (СТ СЭВ 1728—79). «ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности».

2. Государственные и отраслевые стандарты безопасности труда по видам технологических процессов и работ.

VIII. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1. СНиП 111-3—81. Приемка в эксплуатацию законченных строительством объектов. Основные положения.

2. СНиП II-2—80. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

3. СНиП 11-91— 77. Сооружения промышленных предприятий. Нормы проектирования.

4. СНиП II-М.2—72. Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования.

5. Положение о проведении планово-предупредительного ремонта производственных зданий и сооружений.

6. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.

IX. НОРМАЛИЗАЦИЯ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТРУДА

1. ГОСТ 12.1.005—76. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.

2. ГОСТ 12.1.007—76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

3. Государственные стандарты на нормы и требования по видам опасных и вредных производственных факторов, санитарные нормы и правила, утвержденные Минздравом.

4. СНиП 11-4—79. Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования.

5. СНиП Н-ЗЗ—75. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования.

6. СНиП 11-12—77. Защита от шума. Нормы проектирования.

X. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТАЮЩИХ СРЕДСТВАМИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

1. Типовые отраслевые нормы бесплатной выдачи рабочим и служащим спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты.

2. Инструкция о порядке выдачи, хранения и пользования спецодеждой, спецобувыо и другими средствами индивидуальной защиты.

3. Методические указания о порядке разработки и поставки на производство средств индивидуальной защиты.

XI. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТРУДА И ОТДЫХА

1. Список производств, цехов, профессий и должностей с вредными условиями труда, работа в которых дает право на дополнительный отпуск и сокращенный рабочий день.

2. Инструкция о порядке применения списка производств, цехов, профессий и должностей с вредными условиями труда, работа в которых дает право на дополнительный отпуск и сокращенный рабочий день.

3. Список производств, профессий и работ с тяжелыми и вредными условиями труда, на которых запрещается применение труда женщин.

4. Список производств, профессий и работ с тяжелыми и вредными условиями труда, на которых запрещается применение труда лиц, моложе 18 лет.

5. Межотраслевые рекомендации по разработке рациональных режимов труда и отдыха.

XII. ОРГАНИЗАЦИЯ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАБОТАЮЩИХ

1. О проведении предварительных при поступлении на работу и периодических осмотров трудящихся.

2. Перечень производств, профессий и должностей, работа в которых дает право на бесплатное получение лечебно-профилактического питания в связи с особо вредными условиями труда и правил выдачи лечебно-профилактического питания.

3. Правила бесплатной выдачи молока или других равноценных пищевых продуктов рабочим и служащим, занятым в производствах, цехах, на участках и в других подразделениях с вредными условиями труда.

4. Медицинские показания для бесплатной выдачи молока или других равноценных пищевых продуктов рабочим и служащим, непосредственно занятым на работах с вредными условиями труда, утверждены Минздравом.

XIII. САНИТАРНО-БЫТОВОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ РАБОТАЮЩИХ

1. СНиП 11-92—76. Вспомогательные задания и помещения промышленных предприятий. Нормы проектирования.

2. Методические указания по разработке отраслевых норм и правил обеспечения рабочих и служащих служебными и санитарно-бытовыми помещениями.