

Азимова Наталья Николаевна

**Снижение концентрации пыли и уровней шума
в рабочей зоне при абразивной резке**

Специальность 05.26.01. - Охрана труда (машиностроение)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Научный руководитель: д.т.н., профессор, **Булыгин Юрий Игоревич**, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор **Манохин Вячеслав Яковлевич**, профессор кафедры «Техносферной и пожарной безопасности» Воронежского государственного технического университета.

д.т.н., профессор **Асминин Виктор Федорович**, заведующий кафедрой «Безопасности жизнедеятельности и правовых отношений» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова.

Ведущая организация: Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Защита состоится «30» октября 2020 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.058.06 по адресу: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д.1. (тел. для справок 8-863-2-381-345).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донского государственного технического университета и на сайте: **<http://donstu.ru>**.

Автореферат разослан «__»_____2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

А.Т. Рыбак

Общая характеристика работы

Актуальность. Улучшение условий труда, сокращение количества профессиональных заболеваний на производстве является важной государственной задачей. В современном производстве широко распространен рельсорезный инструмент: он применяется на машиностроительных предприятиях, в металлургии, строительстве, в портах (различные подъездные пути), а также на железнодорожном транспорте. Работы при абразивной резке сопряжены с воздействием на оператора ряда опасных и вредных производственных факторов.

Существующие рельсорезные станки, в т.ч. зарубежного производства, характеризуются высокой точностью обработки, производительностью, надежностью, но их показатели в части эксплуатационной безопасности неудовлетворительны – главным образом, вследствие повышенной запылённости и зашумленности рабочей зоны, существенно превышающих действующие санитарные нормы. При резке хрупких материалов ситуация усугубляется выделением (наряду со стружкой) мелкодисперсных пылевых частицы. При длительном воздействии мелкодисперсной пыли сложного химического состава на органы дыхания оператора развивается сидероз – опасное профессиональное заболевание, являющееся разновидностью пневмокониоза.

Увеличение мощности инструмента для резки и при одновременном уменьшении веса и габаритов сопровождается ростом уровней вибрации и шума. Поэтому разработка системы комплексной защиты оператора от воздействия повышенных уровней пыли и шума в рабочей зоне является актуальной.

Соответствие диссертации плану работ ДГТУ. Работа выполнялась в рамках государственного задания министерства образования и науки Российской Федерации на проведение фундаментальной научно-исследовательской работы в 2017/2019 гг. по теме: «Разработка основ технологии проектирования комплексных систем и средств защиты операторов от воздействия опасных и вредных производственных факторов».

Объект исследования – рабочая зона оператора станка для абразивной резки, в которой необходимо обеспечить допустимые (санитарно-гигиенические) параметры по запыленности и шуму.

Предмет исследования – процессы пылеобразования (в т.ч. дисперсный состав образующейся пыли) и генерации шума (вибраций) при абразивной резке, а также разработка и исследование технических средств пылеудаления, пылеулавливания, снижения вибро- и шумовой нагрузки на оператора.

Целью диссертационного исследования является улучшение условий труда операторов рельсорезных станков за счет обеспечения санитарных норм запыленности и шума в рабочей зоне.

Задачами исследования являются:

1. Экспериментальные исследования дисперсного состава абразивно-металлической пыли, а также эффективности системы пылеудаления и пылеулавливания рельсорезного станка.

2. Математическая модель диспергирования абразивно-металлической пыли при резке.

3. Инженерная методика расчёта и выбора элементов пневматической системы пылеудаления и пылеулавливания для режущего инструмента рассматриваемого класса.

4. Модель источника шумообразования при абразивной резке.

5. Экспериментальные исследования спектров шума и запыленности в рабочей зоне рельсорезных станков.

6. Инженерно-технические решения по снижению уровней шума и запыленности в рабочей зоне оператора.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Выявлены закономерности в дисперсном составе пыли, образующейся при абразивной резке рельса, что позволяет обеспечивать эффективное улавливание наиболее опасных частиц диаметром менее 10 мкм. Предложена математическая модель, с высокой точностью описывающая распределение абразивно-металлической пыли при резке рельса (по составу и дисперсности).

2. Разработана реалистичная математическая модель динамики рельсорезных станков (вибрации и формирования шумов), которая учитывает характерные особенности технологического процесса резания и адекватно отражает закономерности формирования вибрации и шума во всем практически интересном диапазоне частот. На ее основе получены явные зависимости, описывающие спектр шума рельсорезных станков и таким образом позволяющие рационально улучшать шумовые параметры подобного оборудования на стадии проектирования.

Научные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Методика и результаты дисперсного анализа образующейся при резке пыли, теоретическое описание процессов пылеудаления и пылеулавливания.

2. Математическая модель параметров распределения (по составу и степени дисперсности) абразивно-металлической пыли при резке.

3. Математическая модель виброакустической динамики рельсорезных станков, учитывающая характерные особенности технологического процесса резания и выявляющая закономерности формирования спектрального состава вибрации и шума.

4. Результаты экспериментальных исследований запыленности и шума при резке, подтверждающие адекватность выносимых на защиту моделей пыле- и шумообразования.

5. Инженерные решения по созданию системы комплексной защиты оператора, обеспечивающие в рабочей зоне концентрацию пыли и уровни вибрации/шума, допускаемые действующими санитарными нормами.

Практическая значимость работы:

1. Экспериментально уточненные коэффициенты гидравлического сопротивления пылеулавливающих аппаратов и найденные закономерности параметров распределения абразивно-металлической пыли использованы в усовершенствованных инженерных методиках расчета аэродинамических характеристик и эффективности системы пылеудаления рельсорезного станка.

2. На основании выполненных натурных и компьютерных экспериментов, а также инженерных расчетов рекомендуется применение циклона с обратным конусом, что значительно снижает аэродинамическое сопротивление фильтровентиляционного моноблока и обеспечивает минимальные траты энергии на его привод

по сравнению с традиционными решениями. Результат рекомендуется использовать для расчета эффективности пылеулавливания.

3. Разработанная соискателем конструкция пылешумозащитного кожуха для режущего инструмента позволяет эффективно реализовать процессы удаления и очистки пылевоздушного потока при обработке конструкций сложной (неплоской) формы. Результат обеспечивается одновременным снижением запыленности и уровней звукового давления в рабочей зоне.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на Международном научно-практическом форуме «Инновации и инжиниринг в формировании инвестиционной привлекательности региона» (Донской государственный технический университет, 2017 г.), VI Всероссийском совещании заведующих кафедрами в области техносферной безопасности, безопасности жизнедеятельности, защиты окружающей среды и природообустройства, (с. Дивноморское, 2017 г.), на Национальных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы науки и техники» в ДГТУ (Ростов-на-Дону, 2017 – 2018 гг.), на ежегодных научно-практических конференциях в ДГТУ (Ростов-на-Дону, 2015 – 2019 гг.)

Публикации. Основные результаты исследований изложены в 10 печатных работах, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК, 2 статьи в базе данных Scopus и один патент РФ на изобретение №2694939 от 19.03.2019 г.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 163 наименований, 4 приложений, содержит 165 страниц текста, включая 19 таблиц и 65 рисунков.

В первой главе выполнен обзор литературных источников существующих исследований шума, вибрации и запыленности станков пильной группы, представлено описание объектов исследования и особенностей технологического процесса абразивной резки – как источника образования опасных и вредных производственных факторов. Следует отметить, что большой объем научных исследований выполнен применительно к фуговальным, рейсмусовым, шипорезным, круглопильным и ленточнопильным станкам. Выделим работы В.А. Замшина, Б.Ч. Месхи, А.Н. Чукарина, С.А. Шамшуры, А.Г. Ли, В.М. Цветкова, М.Ю. Щербы, В.Ф. Асминина, В.А. Романова и др. Для этих групп станков, а также для модельных станков получены выражения создаваемых уровней шума и для снижения запыленности использованы шаровые и циклоны с обратным конусом, а для пильных – метод гидрообеспыливания. Однако эти исследования по снижению запыленности и уровней шума в основном относились к деревообрабатывающим станкам. Применительно к металлообрабатывающим станкам подобные исследования практически не проводились, поэтому при резке твердых и особенно хрупких материалов необходима их оснащение системами обеспыливания, причем интегрированными в конструкцию. Среди разнообразных видов отрезных станков для раскроя абразивными кругами длинномерного материала (рельсы, металлопрокат) на единичные куски-заготовки, а также при срезании излишков проката и распила профилей под углом в цехах монтажно-заготовительных производственных участков получили распространение абразивно-отрезные станки (рис.1). При резке от обрабатываемых изделий отделяется поток стружки и пыли. Угол отклонения потока от

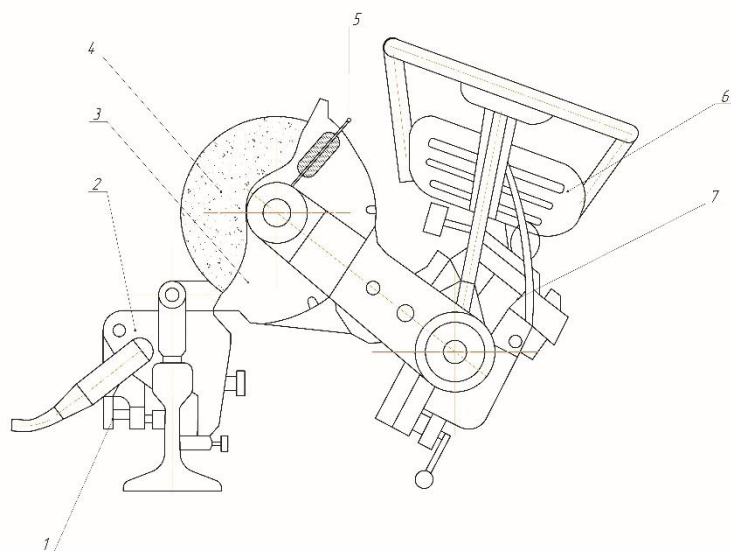


Рис. 1 - Общий вид рельсорезного станка РМК: 1 – винт для крепления захвата на рельсе; 2 – эксцентриковый захват; 3 – защитный кожух; 4 – режущий абразивный диск; 5 – фиксатор положения кожуха; 6 – бензобак; 7 – двигатель

обрабатываемой поверхности зависит от режимов обработки: глубины резания (подачи), физико-механических свойств обрабатываемого материала, температурного режима и др. Схемы направления потока стружек и пылевых частиц при встречном и попутном резании

представлена на рис.2 (здесь s — подача, мм/об; n — частота вращения абразивного диска, об/мин; R — радиус режущего диска, мм; f — угол отклонения потока стружки от

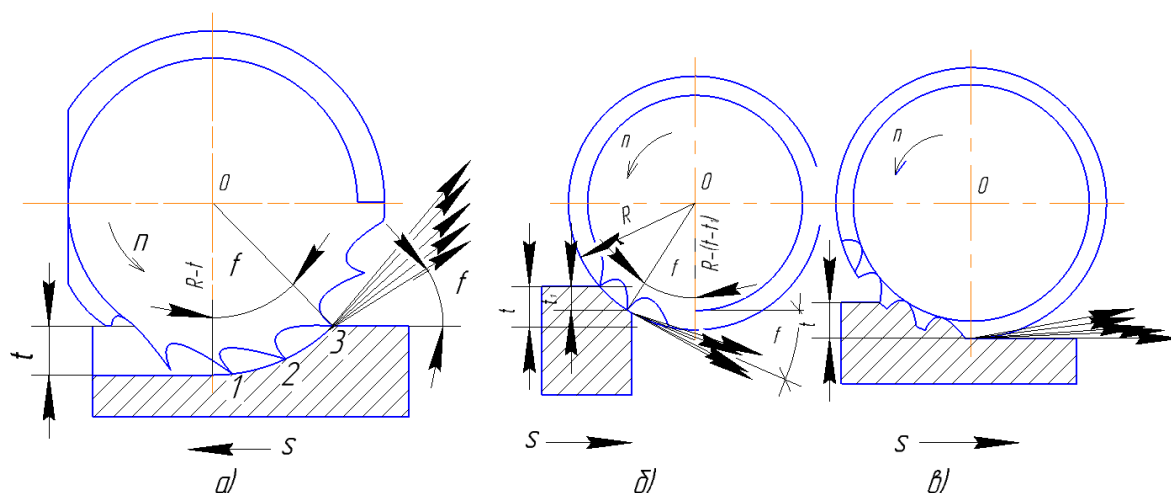


Рис. 2 - Схемы направления потока стружек и пылевых частиц при встречном а) и попутном б), в) резании

обрабатываемой поверхности; t — полная глубина резания, мм; t_1 — глубина резания в момент врезания, мм; 1, 2, 3 — точки соприкосновения). Движение стружки и пылевых частиц определяется, в большей степени режимом и характером резания (попутное или встречное). Зона максимальной запыленности определяется геометрическими параметрами режущего инструмента, режимами резания и характером обработки. Часто она захватывает зону дыхания оператора и (или) соседние рабочие места. Существенно, что отсутствуют инженерные решения для металлорежущих станков, обеспечивающие одновременное снижение шума и запыленности в рабочей зоне. В условиях ремонтно-монтажных работ при замене, вырезке дефектных мест и сборке новых рельс эффективность пылеудаления особо важна, так как необходим чистый стык без загрязнений для повышения качества последующих сварочных работ.

Существует большое разнообразие пылеотсасывающих устройств: индивидуальные навесные на станок, индивидуальные приставные к станкам, стационарные отсасывающие устройства, обслуживающие группы станков.

1. Обзор и анализ исследований запыленности станков пыльной группы показал, что в отличие от исследований шума и вибрации они в основном относились к деревообрабатывающим станкам. Применительно к металлообрабатывающим станкам подобные исследования практически не проводились, поэтому при резке твердых и особенно хрупких материалов необходима разработка и оснащение системами обеспыливания, причем интегрированными в их конструкцию.

2. Анализ условий труда операторов рельсорежных станков показал, что запыленность воздушной среды в зоне дыхания станочников может превышать предельно допустимые концентрации в 2-4 раза, достигая $12-24 \text{ мг/м}^3$, а уровни звука превышены на 8-10 дБА.

3. При современных методах и режимах резания материалов, необходимо станки оборудовать устройствами непрерывного удаления пыли непосредственно от режущих инструментов, используя кинетическую энергию потока стружек и пылевых частиц.

Во второй главе представлены исследования дисперсного состава абразивно-металлической пыли, а также теоретические основы пылеудаления и пылеулавливания при резке. Следует отметить, что вопросам дисперсного анализа, обеспыливания и пылеулавливания в промышленности посвящены труды П.А. Коузова, В.Н. Азарова, Е.А. Штокмана, А.И. Пирумова, В.А. Минко, В.М. Киреева, С.Е. Бутакова, Л.А. Глушкова, М.Т. Камышенко, В.Д. Олифера, И.И. Афанасьева, И.Н. Логачева, а также американцев В. Хемеона и Р. Принга. Первичный дисперсный анализ абразивно-металлической пыли, образовавшейся при резании осуществлялся с помощью лабораторно-измерительного комплекса *Fritsch Analysette 22 Compact*, использующего метод *LALLS* – *low angle laser light scattering*. Встроенное программное обеспечение выдает результаты измерений в первичной графической, а также обработанной цифровой форме. Недостатком программной части этого комплекса является отсутствие детальных сведений об алгоритмах преобразования измеряемых величин и характере выводимых данных. Вычисляемые программой интегральные характеристики распределения частиц по размеру D_{ij} не документированы, что требует проверки их на соответствие как исходным графическим данным, так и классическим моделям Розина – Раммлера и Гаусса – Колмогорова. Отмеченные обстоятельства требуют: нормировать исходную кривую дифференциальной функции распределения, проверить соответствие интегральных показателей D_{ij} как этой функции распределения, так и базовым модельным распределениям. Поэтому необходима высококачественная оцифровка графически представляемых прибором *Fritsch Analysette 22 Compact* результатов фракционного состава, что и было выполнено с помощью специализированной программы. Верификация результатов оцифровки осуществлялась дважды – применительно к данным в нормальном по размеру частиц представлении и в логарифмическом масштабе. Затем результаты первичного анализа сопоставлялись графически (рис.3). Оба оцифрованных ряда подвергались перенормировке – с целью исключить систематическую погрешность и обеспечить выпол-

нение важного для функции распределения $F(x)$ условия $F(\infty) = 1$. Далее строились однотипные модельные распределения, эмпирические параметры которых определялись методами математического программирования и сопоставлялись.

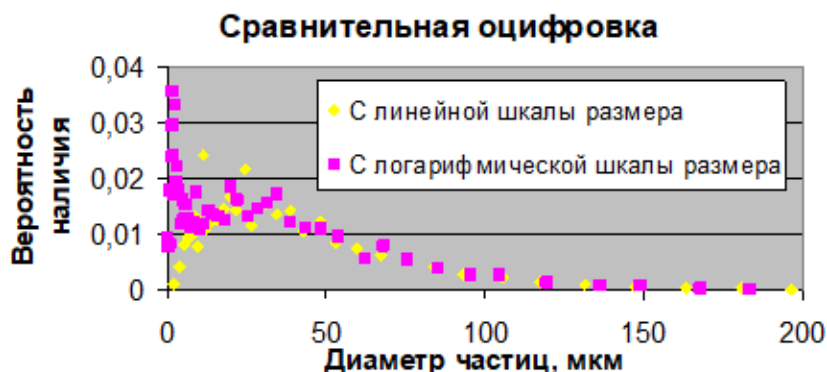


Рис. 3 - Сопоставление результатов оцифровки данных дисперсионного анализа абразивно-металлической пыли: сравниваются данные полученные на основе линейной (желтые точки) и логарифмической (розовые точки) размерных шкал

Заключительным этапом проверки служило сравнение рассчитанных по построенным модельным распределениям осредненных показателей размерного состава пыли с интегральными характеристиками распределений, которые выдаются программным обеспечением прибора – анализатора. О согласии полученных двумя способами данных позволяет судить рис.3, из которого следует, что оба восстановленных распределения практически совпадают, начиная с диаметра 10 мкм. В то же время полтора десятка первых точек, доступных для считывания с графика, имеющего логарифмическую шкалу, свидетельствуют о наличии значительной доли мелких наиболее опасных для человека частиц с размером менее 10 мкм. Для аппроксимации моделью Розина – Раммлера сравниваемых данных (рис. 3) численно решалась оптимизационная задача. Минимизировалась невязка между фактическим и теоретическим распределениями частиц по размерам (1):

$$\Phi(x, D, n) = \sum_k [P(x_k, D, n) - P_k]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

В функционале (1) k – номер узловой (табличной) точки; P_k – соответствующей значению экспериментальной плотности вероятности; D и n – описанные выше параметры модельного распределения Розина – Раммлера.

Поскольку здесь важны размерные характеристики пыли, осредненные на основании некоторого реалистичного распределения, вычислим набор показателей D_{ij} согласно инициализированной выше модели Розина – Раммлера при полученных разными способами значениях D и n . Затем сравним полученные результаты между собой и с интегральными показателями D_{ij} , которые выводятся измерительным прибором. При этом важно понимать, что цель сравнения анализируемых графических распределений с выводимыми прибором интегральными показателями D_{ij} – разобраться с тем, какое именно распределение выводится на экран. То обстоятельство, что выводимая прибором величина D_{43} совпадает со среднеарифметическим диаметром в пяти десятичных знаках, а величина D_{32} – со среднегеометрическим размером столь же точно, означает (гипотеза), что на график по ординате выводится дифференциал взвешенной на x^3 функции распределения:

$$dF(x_k) = P(x_k) x_k^3 dx_k, \quad (2)$$

а не как принято в математике $P(x_k)$. Это обстоятельство является ключевым при интерпретации результатов размерного анализа пылевых частиц на основе распе-

чатанных прибором гистограмм. Проверим гипотезу, рассчитав моменты D_{ij} , приняв и отвергнув ее. Результаты сравнения расчетов при принятии и отвержении нашей гипотезы с соответствующими числовыми данными, выдаваемыми прибором, приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, наша гипотеза о сути выводимых сервисной программой верна.

Результаты статистического анализа графических данных и их интерпретация. Чтобы качественно описать мелкодисперсную часть пыли воспользуемся в качестве исходных графическими данными рис.3 (логарифмический масштаб размера) и аппроксимируем их пятипараметрическим распределением, отвечающим взвешенной сумме двух логнормальных:

$$P(x, D_1, D_2, \sigma_1, \sigma_2, \alpha) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \left[\frac{\alpha}{\sigma_1} + \frac{1-\alpha}{\sigma_2} \right] \cdot \left[\alpha \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - \lg D_1}{\lg \sigma_1} \right)^2} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - \lg D_2}{\lg \sigma_2} \right)^2} \right], \quad (3)$$

где D_1 и D_2 – положение пиков, σ_1, σ_2 – их ширина, α – доля частиц, приходящих на первую моду. Решение оптимизационной задачи средствами Excel дает следующий результат: $D_1 = 45.2$ мкм, $D_2 = 7.0$ мкм, $\sigma_1 = 1.97$ мкм, $\sigma_2 = 2.1$ мкм, $\alpha = 0.858$.

Таблица 1 - Сопоставление заутеровских диаметров пыли в предположении и отвержении гипотезы о взвешивании функции распределения на массу частиц на основе аппроксимаций оцифрованных графических данных прибора *Fritsch Analysette 22 Compact*

Диаметр, мкм	Гипотеза (2) не верна		Гипотеза (2) верна		Числовые данные прибора, мкм
	$D = 48.4$ мкм, $n = 1.588$	$D = 48.6$ мкм, $n = 1.346$	$D = 48.4$ мкм, $n = 1.588$	$D = 48.6$ мкм, $n = 1.346$	
D_{43}	90.2	107.1	43.4	44.4	43.5
D_{42}	83.2	97.9	30.4	27.5	20.9
D_{41}	75.2	87.1	15.6	12.5	8.18
D_{40}	65.5	73.6	7.61	6.11	4.23
D_{32}	76.7	89.5	21.3	17.0	10.0
D_{31}	68.6	78.5	9.38	6.62	3.55
D_{30}	58.9	64.9	4.26	3.15	1.95
D_{21}	61.4	68.8	4.13	2.57	1.25
D_{20}	51.6	55.2	1.90	1.35	0.66
D_{10}	43.4	44.4	0.88	0.71	0.59

Средняя невязка между аппроксимирующей функцией и исходными данными составляет 31 %, а коэффициент корреляции 0.977. Отметим, что этот результат относится к взвешенной на x^3 истинной функции распределения пыли по размерам. Трактовать его можно следующим образом: основную массу пыли (около 85 %) составляют частицы размером более 10 мкм, поэтому для целей практической очистки воздуха его можно заменить двухпараметрическим логнормальным с $D = D_1 = 45.2$ мкм и $\sigma = \sigma_1 = 1.97$ мкм. Такое упрощение, однако, не позволит качественно аппроксимировать D_{ij} с $j < 3$, в то время как учет мелкой фракции пыли важен, например, для вычисления всех используемых диаметров D_{ij} и моментов функции распределения $P(x)$. Результаты сопоставления двойной логнормальной и логнормальной аппроксимации $P(x)$ приведены на рис. 4 и в табл. 2.

Также изучалась возможность приблизить экспериментальные данные распределениями Розина – Раммлера: классическим, обобщенным трехпараметрическим

$$P(x, D, n, m) = (x/D)^m \cdot e^{-(x/D)^n} / \int (x/D)^m \cdot e^{-(x/D)^n} dx, \quad (4)$$

и упрощенным экспоненциальным $P(x)=1/D \cdot e^{-x/D}$ (при $n = 1$). Сопоставить соответствующие результаты между собой и с данными аппроксимации логнормальной и двойной логнормальной функциями позволяют данные рис. 5 и табл. 2.

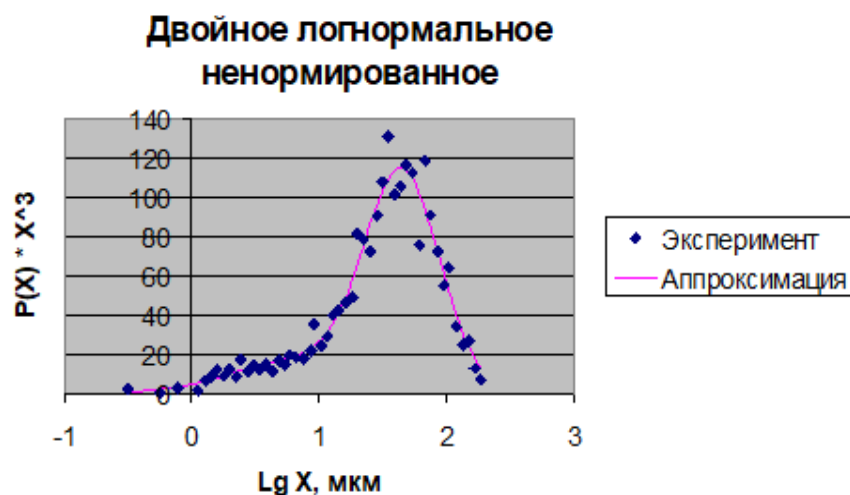


Рис. 4 - Аппроксимация экспериментальных данных двойным логнормальным

распределением.

$$P(x) = 176 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 1.65}{0.416} \right)^2} + 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 0.898}{0.791} \right)^2}.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.31, коэффициент корреляции с экспериментальными точками составляет 0.977

Таблица 2 Интегральные показатели дисперсности пыли, рассчитанные на основе модельных распределений в сопоставлении с оцененными программными средствами прибора *Fritsch Analysette 22 Compact*. Модельные распределения инициализированы по графическим данным

Параметр	Математическая модель, использованная для оценки					Фактическое значение
	Логнормальное	Двойное логнормальное	Розина – Раммлера трехпараметрическое	Розина – Раммлера	Экспоненциальное	
D_{43} , мкм	51.7	44.8	44.7	45.2	43.6	43.5
D_{42} , мкм	41.2	23.0	27.3	28.1	21.4	20.9
D_{41} , мкм	32.0	9.45	12.2	12.9	8.61	8.18
D_{40} , мкм	25.0	4.87	5.99	6.32	4.40	4.24
D_{32} , мкм	32.8	11.8	16.6	17.5	10.3	10.0
D_{31} , мкм	25.2	4.34	6.4	6.92	3.79	3.55
D_{30} , мкм	19.6	2.32	3.07	3.28	2.03	1.95
D_{21} , мкм	19.4	1.59	2.46	2.74	1.39	1.25
D_{20} , мкм	15.1	1.03	1.32	1.42	0.904	0.858
D_{10} , мкм	11.8	0.666	0.704	0.738	0.586	0.588
Мода, мкм	52.1	45.2	48.9	48.4	43.9	43.4
СКО σ , мкм	35.0	37.2	33.6	33.8	39.9	35.7
Асимметрия	1.49	1.17	1.19	1.20	1.41	1.25
Экссесс	2.28	1.49	1.46	1.50	1.66	1.66

Результаты анализа свидетельствуют о близком качестве аппроксимации, достигаемом с использованием пятипараметрического двойного логнормального, трехпараметрического типа Розина – Раммлера, двухпараметрического классического Розина – Раммлера и однопараметрического экспоненциального модельных распределений $P(x)$. В то же время логнормальное распределение совершенно не соответствует опытным данным – поскольку не отражает присутствие в пыли существенной (числовой) доли очень мелких частиц.

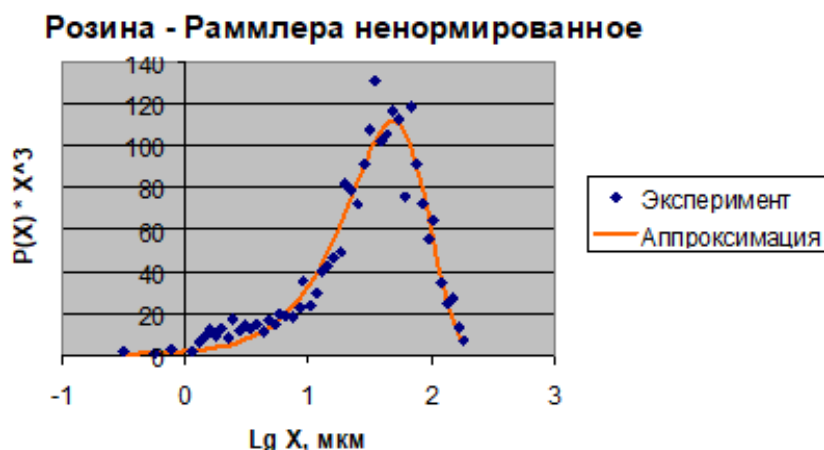


Рис. 5 - Аппроксимация экспериментальных данных распределением Розина – Раммлера

$$P(x) = 7.73 \cdot 10^{-3} \cdot x^{0.322} \cdot \exp[-(x/48.89)^{1.322}].$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.47, коэффициент корреляции с экспериментальными точками 0.972

Из проведенного анализа также следует, что для задач, отличных от расчетов циклонов, наши эксперимен-

тальные данные удобно аппроксимировать однопараметрической монотонно убывающей функцией $P(x) = 1/D \cdot e^{-x/D}$. Данная аппроксимация демонстрирует хорошее согласие с экспериментом для малоразмерных фракций пыли.

Выполненный анализ экспериментальных данных относительно распределения образующихся при резании рельса частиц по размерам сводится к следующему.

1. Выявлены закономерности дисперсного состава пыли на основе лазерной дифракции, что позволило обеспечить улавливание частиц диаметром менее 10 мкм и определить соотношение абразивной и металлической фракций в пробе.

2. Получена математическая модель параметров распределения абразивно-металлической пыли при резке, которая в дальнейшем использована при расчетах эффективности пылеулавливания по ступеням очистки. Лучше прочих подходит простейшее экспоненциальное распределение частиц по размерам

$$P(x) = 1/47.13 \cdot e^{-x/47.13}.$$

3. Задачи пылеулавливания требуют использовать классическое логнормальное распределение $P(x) = 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 1.63}{0.435} \right)^2}$, параметры которого вычислены методами математического программирования, что позволило рассчитать важную для проектирования циклонов величину $D_{32} = 32.8$ мкм, втрое превышающую числовое значение, выдаваемое прибором *Fritsch Analysette 22 Compact*.

4. Изучены геометрические свойства (сферичность и скругленность) пылевых частиц (как металла, так и абразива), выделяющихся при резании рельса.

5. Ввиду того, что на эффективность циклона влияет не только величина D_{32} , но и плотность дисперсного материала, которым в сопоставимых количествах являются сталь – 40,38% и абразив – 59,62%, для обеспечения эффективности пылеулавливания требуется уточняющий анализ, в частности раздельное исследова-

ние дисперсности металлической и абразивной пыли, возникающей в результате работы рельсорезного станка.

6. Выполнен расчет эффективности аппаратов пылеулавливания системы удаления пыли и стружки от режущего инструмента с учетом результатов дисперсного анализа пыли.

7. Приведена методика аэродинамического расчета индивидуальной пневматической системы удаления пыли и стружки от режущего инструмента, позволяющая оценить ее влияние на уровни шума.

8. Уточнена инженерная методика расчёта и выбора элементов системы пылеудаления и пылеулавливания для режущего инструмента.

9. При проектировании пылешумозащитных устройств следует учитывать модель станка, процесс обработки, обрабатываемый материал, количество выделяющейся стружки в единицу времени и другие факторы, исходя из которых определяются транспортные скорости, сопротивления в трубопроводах, а также объемный расход удаляемого воздуха.

Проектирование индивидуальной пневмотранспортной системы пылеудаления от режущего станка. На рис.6 представлена предлагаемая принципиальная расчётная схема устройства рельсорезного станка с защитным кожухом и с системой пылеотсоса.

Необходимый для транспортирования стружки и пыли объем воздуха L , $\text{м}^3/\text{ч}$, находим из уравнения неразрывности потока с учётом конструктивных особенностей системы $L = F \cdot v \cdot \rho_g$, где F - площадь сечения патрубка отвода пыли, м^2 ; v - скорость движения смеси, которая для предотвращения залегания пыли не менее 15 м/с на участках до пылеуловителя и должна составлять $12-15 \text{ м/с}$ после него; ρ_g - плотность воздуха при $t = 20^\circ \text{C}$, принимаем $\rho_g = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

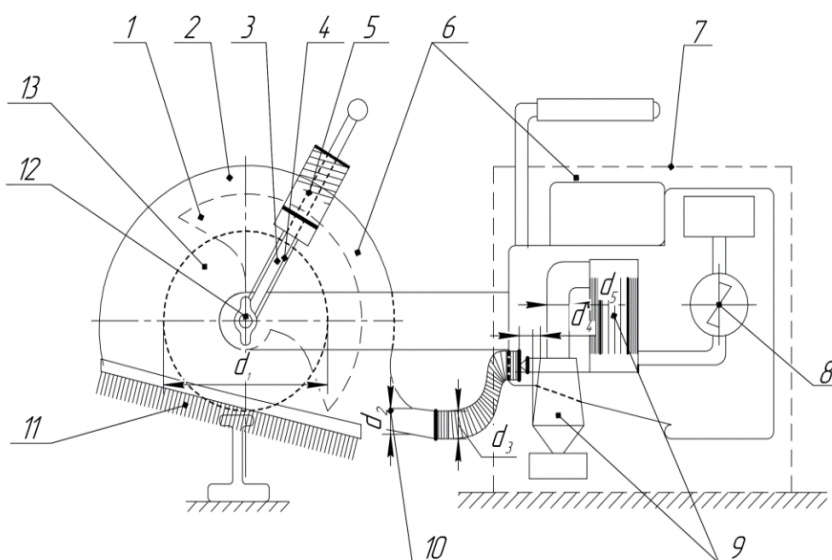


Рис. 6 - Расчетная схема: 1 - внутренний пылеотсасывающий элемент; 2 - внешний силиконовый подвижный пылеотсасывающий кожух; 3 - прорези; 4 - вилочная рукоятка-шток; 5 - пружинный механизм; 6 - система защиты от шума; 7 - звукопоглощающий кожух; 8 - фильтро-вентиляционный моноблок; 9 - двухступенчатая пылеочистка; 10 - патрубок отвода пыли и гибкая трубка; 11 - щетинистое ограждение из нитей термоупругого демпфирующего титаноникелевого сплава; 12 - гайки-барашки; 13 - отрезной диск

Расчет потерь давления по участкам транспортной сети производится в следующей последовательности: на каждом i -том участке определяем динамическое

давление, Па $P_{\partial i} = \frac{\rho_{\partial} \cdot v^2}{2}$, затем потери давления на трение по длине участка из формулы, Па: $P_{li} = \frac{\lambda \cdot \rho_{\partial} \cdot v^2}{2d_i} \cdot l_i = \frac{\lambda \cdot P_{\partial i}}{d_i} \cdot l_i$, где коэффициент трения $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$, число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_{\partial} \cdot v \cdot d}{\mu}$, μ – динамическая вязкость воздуха, м/с²; $\Delta = 0,1 \text{ мм}$ – шероховатость стенок воздуховода и его диаметр d_i , мм.

Потери в местных сопротивлениях по тракту, Па: $P_{mi} = \sum \xi_i \cdot P_{\partial i}$, где $\sum \xi_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на расчетном участке. Общие потери на i -том участке, Па: $P_i = P_{li} + P_{mi}$. На участке стружкоотделитель – циклон с обратным конусом производится аэродинамический расчет аппарата. При заданной оптимальной скорости в теле циклона $v = 3,5 \text{ м/с}$ рассчитывается необходимая площадь сечения $F = \frac{L}{3600 \cdot v_{\text{онм}}}$ и определяется расчетный диаметр циклона

$D_p = \sqrt{\frac{\pi \cdot L}{4 \cdot v_{\text{ц}}}}$, м. Гидравлические потери в циклонном аппарате находятся аналогично и с учетом КГС циклона на основе зависимости: $P_{\text{ц}} = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \zeta_{\text{маб}} + \kappa_3$, где κ_1 – поправочный коэффициент на диаметр; κ_2 – поправочный коэффициент на запыленность воздуха; $\kappa_3 = 0$ – для одиночных циклонов; $\zeta_{\text{маб}}$ – коэффициент местного сопротивления циклона.

Гидравлическое сопротивление фильтра складывается из сопротивления корпуса P_{κ} , сопротивления фильтровальной ткани P_m и сопротивления осевшей на ткань пыли $P_{\text{пл}}$, Па: $P_{\text{фи}} = P_{\kappa} + P_m + P_{\text{пл}}$. Технологический расчет фильтра сводится к определению площади фильтровальной ткани, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом. Наконец определяются суммарные потери в сети по всем участкам, которые позволяют выбрать параметры вытяжного вентилятора системы.

Оценка влияния индивидуальной пневмотранспортной системы пылеудаления от режущего станка на уровне шума. Аэродинамический расчет показал, что при мощности двигателя рельсорезного станка около 5 кВт мощность на привод вентилятора системы пыле- и стружкоудаления составит 0,22 кВт, что незначительно (не более 5–7 %) и не оказывает влияния на качество процесса резки. При этом не требуется отдельный двигатель на привод пневмотранспортной системы пылеудаления, следовательно, в конструкции рельсорезного станка не будет дополнительного источника шума. Кроме того, использование циклона с обратным конусом (ЦОК) снижает общее сопротивление системы пылеудаления, поскольку экспериментально установлено, что по сравнению с цилиндрическими аппаратами ЦОК имеет гораздо более низкий коэффициент гидравлического сопротивления.

1. Выполнен расчет эффективности аппаратов пылеулавливания системы удаления пыли и стружки от режущего инструмента с учетом результатов дисперсного анализа пыли.

2. Ввиду того, что на эффективность циклона влияет не только величина

D_{32} , но и плотность дисперсного материала, которым в сопоставимых количествах являются сталь-40,38% и абразив-59,62%, для обеспечения эффективности пылеулавливания требуется уточняющий анализ, в частности раздельное исследование дисперсности металлической и абразивной пыли, возникающей в результате работы рельсорезного станка.

В третьей главе представлены теоретические исследования процесса шумообразования при резке материалов. Основными источниками шума при работе металлорежущих станков являются сам процесс резания и вибрации технологической системы, дополнительными - элементы их приводов.

Теоретическая модель источника шумообразования при резке.

Чтобы определить звуковое давление стального рельса необходимо определить динамику его колебаний под действием режущего инструмента. Поперечные колебания рельса (стержня) описываются дифференциальным уравнением с частными производными четвертого порядка:

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = P(t) \delta(x - x_0), \quad (5)$$

где μ — распределенная масса, кг/м, $\mu = \rho F$; ρ — плотность материала (рельса), кг/м³, $\rho = 7,3 \cdot 10^3$; F — площадь поперечного сечения, м²; y — поперечная координата рельса, м, $y = y(x, t)$; t — время, с; E — модуль упругости, Па, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$; J — момент инерции, кг·м²; x — продольная координата, м; $P(t)$ — силовое воздействие со стороны технологического процесса, Н; $\delta(x - x_0)$ — дельта-функция, смещенная по координате x_0 ; x_0 — точка приложения силы, м.

С учетом силового воздействия и условий закрепления, соответствующих шарнирному при абразивной резке уравнение (5) примет вид:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\mu} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{1}{\mu} P \sin(0,1nk_c t + \varphi) \delta(x - x_0), \quad (6)$$

где $P(t) = P \sin(0,1nk_c t + \varphi)$ — периодическая вынуждающая сила, Н; n — частота вращения, с⁻¹; k_c — коэффициент содержания абразивного материала; φ — начальная фаза, радиан; $EJ = \text{const}$, $\mu = \text{const}$. Используя метод разделения переменных получим:

$$\frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} \sin \frac{\pi k x}{l} + \frac{EJ}{\mu} \left(\frac{\pi k}{l} \right)^4 y_1(t) \sin \frac{\pi k x}{l} = \frac{1}{\mu} P \sin(0,1nk_c t + \varphi) \sin \frac{\pi k x}{l} \sin \frac{\pi k x_0}{l} \quad (7)$$

где l — расстояние между опорами.

Общее решение имеет вид:

$$y_{\text{общ}} = C_1 \cos \left(\sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \frac{\pi^2 k^2}{l^2} t \right) + C_2 \sin \left(\sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \frac{\pi^2 k^2}{l^2} t \right), \quad (8)$$

где C_1, C_2 — постоянные интегрирования.

Частное решение уравнения (7) получаем в виде:

$$y_1(t) = \frac{P \sin(0,1nk_c t + \varphi) \sin \frac{\pi k x_0}{l}}{EJ \left(\frac{\pi k}{l} \right)^4 - (0,1nk_c)^2}. \quad (9)$$

Таким образом, на шумность процесса резания влияет соотношение общего

$u_{\text{общ}}$ и частного $u_1(t)$ решений уравнения (7), представленных выше.

Звуковое давление определяется формулой:

$$P = 9,5 \frac{v_k}{r} (f_k \cdot S \cdot l)^{0,5}, \quad (10)$$

где v_k — скорость колебаний, м/с; r — расстояние от источника до расчетной точки, м; f_k — собственные частоты колебаний, с^{-1} , $f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi k}{l}\right)^4 \frac{EJ}{\mu} + \frac{j_{\text{пр}}}{\mu}}$; $j_{\text{пр}}$ — приведенная жесткость технологической системы, Н/м; S — площадь излучающей звук поверхности, м^2 .

Уровни звукового давления определялись из формулы:

$$L = 20 \lg \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \lg \frac{v_k}{r} + 10 \lg \left[\left(\frac{\pi k}{l} \right)^4 \frac{EJ}{\rho} + \frac{j_{\text{пр}}}{\rho} \right] \cdot S + 10 \lg l + 106. \quad (11)$$

Полученная формула (11) позволяет рассчитать фактические октавные уровни звукового давления и требуемую звукоизоляцию по октавам из выражения $\Delta L = L - L_{\text{доп}}$, где $L_{\text{доп}}$ — предельно допустимая санитарно-гигиеническая норма шума (ПДУ), дБ. Формула (11) учитывает не только скорости колебаний, но и геометрические и физико-механические характеристики рельса. Полученные зависимости являются основой для разработки системы шумозащиты по критерию выполнения санитарных норм.

1. Разработана оригинальная математическая модель виброакустической динамики рельсорежных станков, которая корректно учитывает технологические особенности процесса (резания) и физические закономерности шумо- и виброгенерации.

2. Предложена инженерная методика расчета и выбора элементов системы шумозащиты для режущего инструмента по критерию выполнения санитарных норм с учетом особенностей технологического процесса резания и закономерностей шумо- и виброгенерации.

3. Проведены эксперименты по измерению эффективности шумопоглощения защитным кожухом для рельсорежного станка. Для описания экспериментальных данных предложена эмпирическая модель.

4. Установлено, что разработанная методика расчета и выбора элементов для системы шумозащиты позволяет гарантированно обеспечивать требуемое снижение уровня шума (подтверждено хорошим согласием экспериментальных и расчетных данных).

В четвертой главе экспериментально исследованы элементы как групповой, так и индивидуальной систем пылеудаления и пылеулавливания. На первом этапе были определены аэродинамические характеристики центробежных пылеуловителей разной формы при проведении параллельных сравнительных испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.018-79 «Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». Экспериментально найдены полные, статические и динамические давления, скорости движения воздушного потока в разных точках по сечениям на входе и выходе циклонных аппаратов при различной задаваемой производительности вытяжного вентилятора. В ходе экспериментов по изучению аэродинамических параметров циклонных аппаратов было произведено более 1500 замеров, получено около 5000 значений данных, которые были статистически обработаны и представ-

лены в виде графиков. Экспериментально доказано, что величины КГС «ЦОК-200-300» оказались в 2-2,2 раза меньше КГС «ЦН-15у-300», за счёт более высокой скорости потока в теле аппарата, а с увеличением производительности (по воздуху) сравниваемых циклонных аппаратов наблюдается рост КГС (рис.7, а-б).

На втором этапе исследований была определена эффективность системы пылеудаления и пылеулавливания. В циклоне с обратным конусом (ЦОК) за счёт конусного профиля используется увеличенная центробежная сила, действующая на пылевую частицу, а возможность регулирования глубины погружения выхлопного патрубка в тело циклона обеспечивает уменьшение выноса пыли вторичными вихревыми течениями воздуха. Регулирование соотношения объёма рабочей части ЦОК и бункера позволяет более эффективно улавливать пыли разной плотности, что необходимо учитывать в условиях образующейся неоднородной по составу абразивно-металлической пыли. Испытания проводились на малоразмерной экспериментальной установке, где фиксировались моменты времени, когда происходил выброс исследуемой пыли из выходного патрубка циклона при одинаковом значении расхода подаваемого воздуха $Q = 27 \text{ м}^3/\text{ч}$

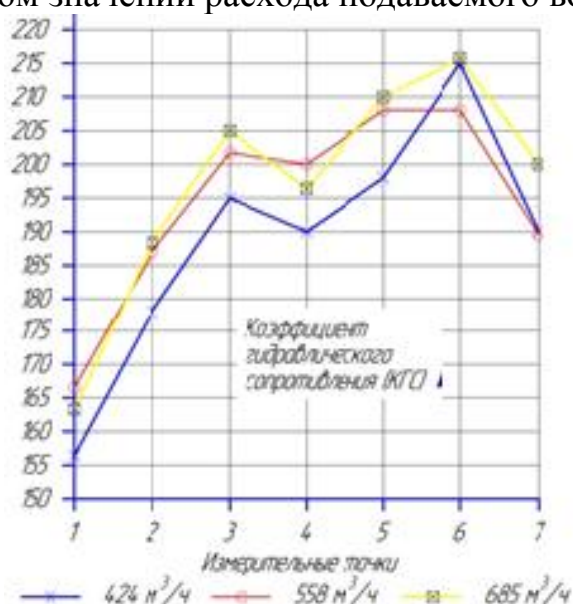


Рис. 7а - Коэффициент гидравлического сопротивления циклона «ЦН-15у-300» при различных режимах работы вентилятора

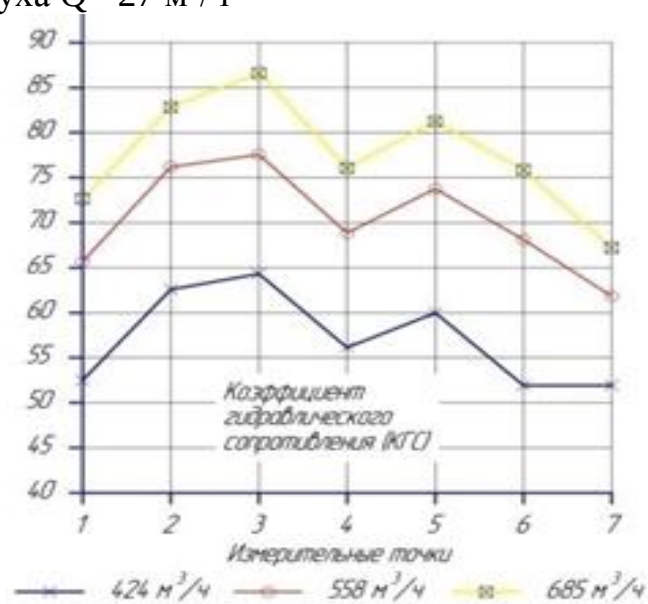


Рис. 7б - Коэффициент гидравлического сопротивления циклона «ЦОК-200-300» при различных режимах работы вентилятора

Координаты точек измерений давлений и скоростей (1-7), а также их количество определялись формой и размерами мерного круглого сечения в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 и требованиями точности аэродинамических измерений.

($V=4,5 \text{ м/с}$). Масса пыли в бункере измерялась с помощью точных электронных весов и рассчитывался коэффициент пылеочистки: $\eta = \frac{m_{\text{ВЫХ}}}{m_{\text{ВХ}}} \cdot 100\%$, где $m_{\text{ВЫХ}}$ — масса пыли после очистки, г; $m_{\text{ВХ}}$ — масса пыли в дозаторе до очистки, г. Исследования эффективности улавливания абразивно-металлической пыли производились для разных объёмов бункеров от 5 л до 30 л в диапазоне частиц 40-160 мкм при расходе $27 \text{ м}^3/\text{ч}$. Эффективность пылеочистки выше у конического циклона по

сравнению с цилиндрическим циклоном и возрастает в случае увеличения отношения объема бункера к рабочему объему циклона (рис.8).

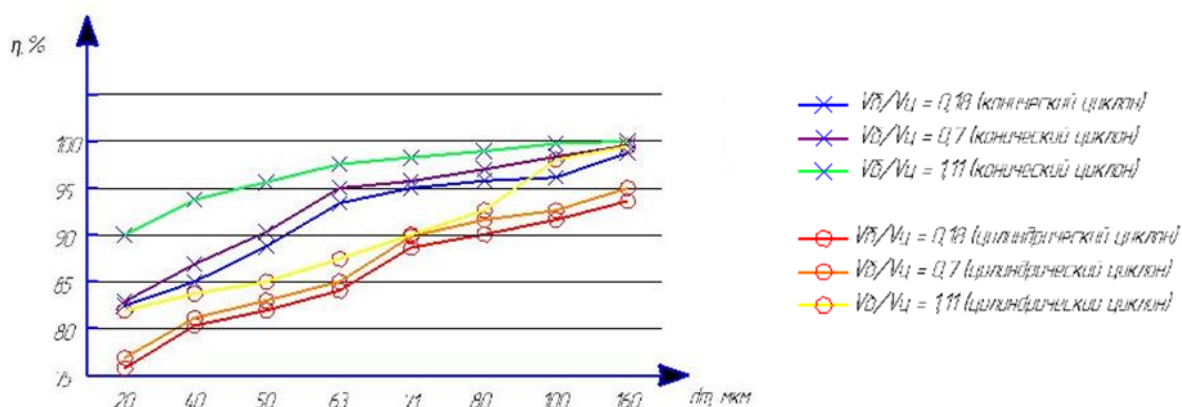


Рис. 8 - Эффективность пылеулавливания абразивно-металлической пыли коническим циклоном по сравнению с цилиндрическим в зависимости от дисперсного состава, отношения объема бункера к рабочему объему циклона при оптимальном соотношении $N_p/N_{\text{ц}}=0,6$

Соотношения объема бункера к рабочему объему циклона менялись в ходе исследований и соответственно были равны: для бункера объемом 5 л: $V_b/V_{\text{кц}}=0,18$; для 19 л: $V_b/V_{\text{кц}}=0,7$; для 30 л: $V_b/V_{\text{кц}}=1,11$. Как следует из экспериментов, эффективность пылеочистки выше при объеме бункера 30 л и соотношении $V_b/V_{\text{кц}}=1,11$. Также проводились исследования влияния глубины погружения выхлопного патрубка циклона на эффективность пылеулавливания. Установлено, что оптимальное соотношение $N_p/N_{\text{ц}}$ составляет 0,6 (рис. 8).

1. Экспериментально определены (1500 измерений, получено 5000 значений ключевых параметров) следующие параметры потока в коническом и цилиндрическом циклонах при изменении производительности вентилятора в широком диапазоне: 1) давление (статическое, динамическое, полное); 2) эпюры скорости во входном и выходном сечениях. После статистической обработки полученные результаты представлены в графической форме, а также в виде явных аналитических зависимостей.

2. Установлено экспериментально, что повышение производительности циклона сопровождается ростом КГС. Результат объясняется усилением турбулизации потока с ростом средней скорости.

3. Экспериментально доказано, что КГС аппарата «ЦОК-200-300» в 2-2,2 раза меньше, чем КГС циклона «ЦН-15у-300». Результат объясняется более высокой скоростью потока в «ЦН-15у-300».

4. Сравнительный анализ свидетельствует, что циклон с обратным конусом имеет лучшие аэродинамические характеристики и как следствие повышенную эффективность пылеулавливания по сравнению с цилиндрическим циклоном. Результат объясняется более развитой турбулентностью в потоке очищаемого газа при использовании циклона («ЦОК-200-300»).

В пятой главе представлены инженерно-технические решения по снижению уровней шума и запыленности в рабочей зоне оператора.

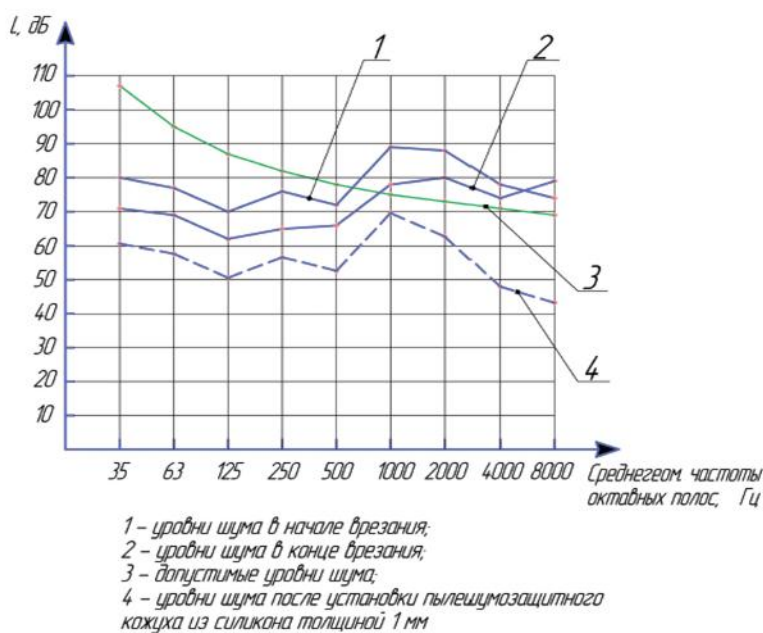
Предложен защитный кожух для режущего инструмента с системой пылеотсоса, который состоит из прочного внутреннего и внешнего силиконового пылеотсасывающих элементов кожуха, соединенных с фильтровентиляционным моноблоком, а также двухконтурной системой защиты от шума (рис.6). Повышенная эф-

фективность пылеулавливания при обработке конструкций сложной формы достигается за счет применения кожуха с кромкой, которая по периметру снабжена щетинками из равномерно чередующихся шумопоглощающих нитей на основе углепластикового волокна и термоупругого демпфирующего титаноникелевого сплава.

Экспериментальные исследования в рабочей зоне оператора подтвердили эффективность пыле- и шумозащитного кожуха станка при резке. Исследования закономерностей формирования спектров шума и вибрации рельсорезных станков проводились на холостом ходу и при типичных режимах обработки. Результаты измерений уровней шума по мере увеличения глубины резания без и при использовании пыле- и шумозащитного кожуха для рельсорезного станка представлены на рис 9. На максимальных частотах вращения уровни звукового давления станка превышают предельно-допустимые значения. При увеличении частоты вращения интенсивность звукового излучения возрастает. Расширяется также диапазон спектра, в котором имеется превышение уровней звукового давления над ПДУ, которое достигает 8-11дБ в средне- и высокочастотной части спектра 500-8000 Гц. После установки пыле- и шумозащитного кожуха санитарные нормы шума и концентрации пыли в рабочей зоне металлорежущего станка обеспечиваются. Проведенные исследования доказывают эффективность разработанной конструкции системы пыле- и шумозащиты

оператора рельсорезного станка и позволяют ее рекомендовать в производстве.

Рис. 9 - Изменение уровней шума по мере увеличения глубины резания без и при использовании пыле- и шумозащитного кожуха для рельсорезного станка



Основные результаты исследований можно сформулировать в следующих выводах:

1. Непосредственные измерения и анализ условий труда на рабочих местах операторов рельсорежных станков показали, что несоответствие санитарным нормам

наблюдается по основным опасным и вредным производственным факторам – запыленности и шуму. Концентрация пыли превышает предельно-допустимую концентрацию в 2-4 раза, а уровни звукового давления ПДУ – до 15 дБ.

2. Установлено, что исследованные полидисперсные микрочастицы абразивно-металлической пыли хорошо описываются однопараметрическим экспоненциальным распределением, а для расчета циклонов адекватным представляется логнормальное распределение частиц по размерам, параметры которого определены методами математического программирования на основе результатов экспериментальных измерений. Выполненные исследования позволили уточнить инженерную методику расчёта и выбора элементов системы пылеудаления и пылеулавливания.

3. Разработана математическая модель виброакустической динамики рельсорезных станков, учитывающая специфику технологического процесса резания, адекватно отражающая закономерности формирования вибрации и шума в пределах рассматриваемого спектра частот.

4. Экспериментально исследованы элементы как групповой, так и индивидуальной систем пылеудаления и пылеулавливания. Установлена более высокая эффективность пылеочистки коническим циклоном по сравнению с цилиндрическим.

5. Разработана оригинальная конструкция системы пыле- и шумозащиты рельсорезных станков: на основе расчета конструктивных параметров по критериям одновременного не превышения ПДК пыли и спектральных уровней шума.

6. Промышленная апробация и испытания оригинальной защитной конструкции для режущего инструмента с системой пылеотсоса выполнена в ОАО «РЖД»: при замене дефектных участков бесстыкового пути.

Установлено, что предлагаемые технические решения обеспечивают годовой экономический эффект благодаря повышению производительности в размере 14591 руб./станок и социально-экономический эффект в виде экономии за счет снижения заболеваемости и травматизма рабочих в размере 84536,71 руб. Срок окупаемости капитальных вложений составляет 2 года и 7 месяцев соответственно.

7. Разработанная методика системного моделирования и комплексной оптимизации пыле - шумозащиты для рельсорезного станка успешно внедрена в образовательный процесс ДГТУ, направление «Техносферная безопасность».

Положения диссертации опубликованы в 10 работах, основными из которых являются:

1. Статьи в журналах, входящих в «Перечень ведущих научных журналов.....»

1.1 Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. - Т. 17, № 3 (90). - С. 156-165.

1.2. Азимова, Н. Н. Комплексная система пыле- и шумозащиты операторов рельсорезных станков / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин // Безопасность труда в промышленности. 2019 – № 9 – С. 64-71. – Режим доступа: DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-64-71.

2. Статьи в журналах, входящих в «Научометрическую базу данных Scopus.....»

2.1 Azimova, N. N. Investigation of the processes of separation and spread of welding aerosols taking into account various types of heat and mass transfer to ensure safe welding conditions in confined space / Dmitry V. Rogozin, Irina S. Kuptsova, Natalia N. Azimova and Viktor F. Khlystunov // MATEC Web Conference. - 2018. - Volume 226. - (XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018); Rostov-on-Don, Russian Federation, September 12-14, 2018). - <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822603028>

3 Патенты РФ

3.1 Денисов О.В., Азимова Н.Н., Трюхан А.В., Попов Д.С., Месхи Б.Ч., Купцова И.С., Булыгин Ю.И. Пат. №2694939 Рос. Федерация. Защитный кожух для режущего инструмента с системой пылеотсоса/ О.В. Денисов, Н.Н. Азимова, А.В. Трюхан и др.; заявл. 19.03.2019; опубл. 18.07.2019, Бюл. № 20.