

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Государственное высшее учебное заведение
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Е.А. Новикова

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА
В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Монография

Днепропетровск
НГУ
2013

УДК 622.81:622.647.21
ББК 33.16
Н73

Рекомендовано до друку вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 6 від 02.07.13).

Рецензенти:

О.С. Беліков, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»;

В.Г. Шевченко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., вчен. секр. Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова.

Новикова Е.А.

Н73 Повышение безопасности конвейерного транспорта в горных выработках угольных шахт : моногр. / Е.А. Новикова. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 99 с.

ISBN 978-966-350-421-6

Посвящена повышению уровня пылевзрывобезопасности конвейерного транспорта в выработках угольных шахт, которое заключается в установлении закономерностей процессов образования, распространения и отложения пыли. Эти процессы позволяют прогнозировать динамику выноса и осаждения угольной пыли с учетом влияния подконвейерного пространства и разработки на их основе способов и средств повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок, оборудованных конвейерным транспортом.

Для студентов, инженерно-технических работников, сотрудников высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и проектных организаций горнодобывающей промышленности.

Ил. 35. Библиогр.: 123 назв.

УДК 622.81:622.647.21
ББК 33.16

ISBN 978-966-350-421-6

© О.О. Новікова, 2013
© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	6
1.1. Состояние пылевзрывобезопасности выработок угольных шахт.....	6
1.2. Анализ состояния исследований по вопросам образования, распространения и отложения пыли в горных выработках шахт.....	14
1.3. Анализ способов и средств повышения пылевзрывобезопасности горных выработок, оборудованных конвейерным транспортом.....	22
ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С КОНВЕЙЕРНЫМ ТРАНСПОРТОМ.....	30
2.1. Анализ процесса пылеобразования при добыче и транспортировке полезных ископаемых.....	30
2.2. Динамика рудничных аэрозолей по длине горной выработки с учетом гравитационного и инерционного осаждения частиц пыли.....	33
2.3. Математическая модель образования, распространения и отложения пыли по длине горных выработок оборудованных конвейером.....	45
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ В КОНВЕЙЕРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	56
3.1. Методы исследований запыленности шахтного воздуха.....	56
3.2. Характеристика источников запыленности воздуха в конвейерных выработках.....	58
3.3. Интенсивность накопления частиц угля в подконвейерном пространстве.....	60
3.4. Экспериментальные исследования динамики запыленности воздуха в конвейерных выработках.....	65
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ КОНВЕЙЕРНЫХ ВЫРАБОТОК.....	74
4.1. Способы и средства снижения пылеотложений в подконвейерном пространстве конвейерных выработок.....	74
4.2. Обоснование основных параметров средств снижения интенсивности пылеотложений.....	76
4.3. Обоснование параметров аспирационного укрытия узла перегрузки ленточного конвейера.....	79
4.4. Разработка способов и средств повышения уровня безопасности конвейерного транспорта.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Украина входит в первую десятку стран мира по уровню добычи угля. Высокий уровень угледобычи, как правило, связан с ее интенсификацией, постоянным усложнением горно-геологических условий в угольных шахтах, с увеличением глубины горных работ, что предъявляет более жесткие требования к технике безопасности и в первую очередь к способам и средствам борьбы с пылегазовыми взрывами, относящимися к одному из наиболее тяжелых видов аварий. Многие из используемых в настоящее время в угольной промышленности технических средств предупреждения и локализации взрывов горючих смесей морально устарели, недостаточно эффективны и перестали удовлетворять возросшим требованиям и условиям работы в шахтах. Они не обеспечивают взрывозащиту мест интенсивного пылеотложения. Об этом свидетельствует самая крупная авария в Донбассе по катастрофическим последствиям, которая произошла на шахте им. Баракова, где взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно распространился по стационарной конвейерной линии, подконвейерное пространство в данном случае выполняло функцию проводника. Это свидетельствует о том, что уровень опасности взрыва пылеметановоздушных смесей в конвейерных выработках очень высок и система взрывозащиты в этих выработках требует принципиального совершенствования. Существующие устройства, как видно, не позволяют полностью локализовать последствия взрыва. Необходимо разрабатывать способы и средства, позволяющие предотвратить воспламенение угольной пыли в подконвейерном пространстве. Недостаточно эффективными являются также применяемые в настоящее время методы определения параметров локализации и уборки угольной пыли в зависимости от производительности добычных машин, скорости воздушной струи, опасности пыли по взрываемости.

Для решения проблемы борьбы с пылью, необходимо исследовать процесс ее образования, распространения и отложения в горных выработках шахт и рудников при выполнении основных технологических процессов. До настоящего времени многие из этих вопросов изучены недостаточно.

Основная трудность, возникающая при теоретическом исследовании процесса распространения пыли в горных выработках, состоит в учете ее осаждения и взметывания, главным образом на почве выработки. Слишком упрощенные предположения о характере и механизме этих процессов приводят к качественному расхождению теоретических результатов с наблюдениями.

Изучению явлений, связанных с процессами образования, распространения и отложения пыли, протекающими в горных выработках шахт при проведении горных работ, посвящено значительное количество исследований. Однако до настоящего времени при расчете концентрации и дисперсного состава рудничных аэрозолей по длине и высоте горных выработок недостаточно учитываются процессы гравитационного и инерционного осаждения частиц пыли при работе конвейера. Известно, что в конвейерных выработках эти факторы являются преобладающими. Поэтому параметры пылеотложений должны устанавливаться с их учетом. Кроме того, для конвейерных выработок отсутствуют

эффективные способы и технические средства снижения интенсивности отложения пыли в подконвейерном пространстве.

В связи с изложенным, исследование процессов образования, распространения и отложения пыли в конвейерных выработках угольных шахт и разработка на этой основе способов и средств повышения уровня их пылевзрывобезопасности, является актуальной задачей.

Решению этой актуальной задачи и посвящается данная монография.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Состояние пылевзрывобезопасности выработок угольных шахт

Украина добывает 2% угля от мировой добычи и занимает в этом направлении 10 место в мире. В настоящее время в угледобывающей отрасли насчитывается 178 предприятий, входящих в сферу управления Минуглепрома и 171 предприятие других министерств и ведомств. В числе действующих шахт 76 являются сверхкатегорными и третьей категории по метану, 84 разрабатываемых шахтопластов опасны по внезапным выбросам угля и газа, 117 шахт разрабатывают пласты угля, опасные по взрывчатости угольной пыли, 19 шахт разрабатывают пласты угля, склонного к самовозгоранию. На 41 шахте работы ведутся на глубине 500 - 700м, на 40 шахтах - на глубине 700 – 1000м и на 42 шахтах - на глубине более 1000м [9].

В угольной промышленности Украины за период с 2006 по 2010г.г. имели место 262 крупных аварий и 278 аварийных ситуаций.

Из имевших место за этот период 262 (48,5%) подземных аварий, 84 (32%) – это подземные пожары (65 экзогенных и 19 эндогенных), 53 (20,2%) аварии на поверхности, 21 (8,0%) взрывы газа и угольной пыли, 14 (5,3%) внезапные выбросы угля и газа, 88 (33,5%) обрушения горных пород, 2 (0,7%) затопления горных выработок. Остальные 278 (51,4%) случаев связаны с работами по предупреждению и ликвидации последствий аварийных ситуаций и несчастных случаев. Данные об аварийности приведены в таблице 1.1.

Данные табл. 1.1 свидетельствуют о том, что за период 2006 – 2010 гг. в угледобывающей отрасли страны при снижении объемов добычи угля произошло 262 аварии, в результате которых погибло 768 человек. В 2010 году уровень травматизма со смертельным исходом на предприятиях Минуглепрома составил 68,75% от всех погибших в отрасли (88 случаев из 128).

Таблица 1.1

Состояние аварийности в угольной промышленности Украины

Показатели	Всего за 2006-2010г.г.	Среднее 2006-2010г.г.
Всего аварий и аварийных ситуаций	540	108
Всего аварий	262	52,4
в том числе подземных пожаров: всего	84	16,8
пожаров экзогенных	65	13
пожаров эндогенных	19	3,8
Взрывов газа и угольной пыли	21	4,2
Внезапных выбросов	14	2,8
Обрушений пород	88	17,6
Затоплений	2	0,4
Аварий на поверхности	53	10,6

Показатели	Всего за 2006-2010г.г.	Среднее 2006-2010г.г.
Аварийных ситуаций	278	55,6
Число пострадавших в авариях со смертельным исходом, чел	768	153,6
Число пострадавших, которым оказывалась медицинская помощь, чел	11805	2361
Общий ущерб от аварий и аварийных ситуаций, тыс. грн.	321430	64286
Ущерб предприятий от аварий и аварийных ситуаций, тыс. грн	303627	60725,4
в том числе: затраты предприятия на ликвидацию аварий и аварийных ситуаций, тыс. грн	17899	3579,8
от потери добычи, тыс. грн	219361	43872,2
от потери оборудования, тыс. грн	36248	7249,6
от выхода из строя горных выработок, тыс.грн	7359	1471,8
другие расходы, тыс. грн	6577	1315,4
Потери добычи угля за период аварий и аварийных ситуаций, тыс. тонн	699	139,8
Протяженность выработок, вышедших из строя из-за аварий и аварийных ситуаций, м	17549	3509,8

Значительную часть аварий на шахтах угольной отрасли составляют взрывы пыли, которые являются наиболее тяжелыми по своим последствиям среди опасностей горного производства и в большинстве случаев носят характер катастроф.

В мировой практике по добыче угля известны аварии связанные со взрывом угольной пыли унесшие жизни многих горняков. Так, в 1942 г. на шахте "Хонкейко" в Маньчжурии в результате взрыва метана и угольной пыли погибло 1527 горняков. Крупнейшая катастрофа, связанная с взрывом пыли, произошла на негазовой шахте "Курьер" (Франция) в 1906 г., когда из 1664 горняков, находящихся в шахте, погибло 1099 человек [10].

В условиях современного производства, несмотря на коренное изменение технологии угледобычи и технического перевооружения шахт в основных угледобывающих странах мира, проблема предупреждения взрывов метана и угольной пыли сохраняет свою актуальность [10]. Об этом свидетельствуют результаты статистического сбора данных о взрывах и пожарах, происшедших на угольных шахтах за последние 30 лет существования СССР, проведенного МакНИИ [11].

Среди прочих источников воспламенения взрывчатых пылегазовых смесей в шахтах следует особо отметить пожары на конвейерах (загорания приводов, турбомуфт и конвейерных, лент) [12, 13]. Поэтому выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особо опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли. Из приведенных МакНИИ

данных [11] следует, что большинство (до 87 %) зарегистрированных случаев взрывов угольной пыли в шахтах было инициировано взрывами метана, тогда как остальные (13 %) возникли при ведении взрывных работ. Кроме того, следует отметить, что взрывы угольной пыли имели место на шахтах, разрабатывающих пласты угля различной стадии метаморфизма. При этом в подавляющем большинстве случаев (88 %) принимающая участие во взрыве угольная пыль имела выход летучих веществ более 20 %, а в остальных - от 14 до 20 %. Взрывы с участием угольной пыли с выходом летучих веществ менее 14 % за рассматриваемый период не зарегистрированы.

Таким образом, доля взрывов пыли в общем количестве взрывов за последние 30 лет существования СССР составила на различных участках от 14,5% до 26% при общешахтном показателе 20,8%. При этом взрывы с участием угольной пыли приводят к более тяжелым последствиям. Так, из 200 погибших во время крупных аварий на шахтах Украины за 1991-1997 гг., 119 шахтеров (59% от 200) погибло вследствие взрыва пыли (для сравнения – от взрыва метана погибло 49 человек или 25% от общего количества) [14].

Применяемые в настоящее время системы взрывозащиты и взрывоподавления недостаточно эффективны. Они не обеспечивают взрывозащиту мест интенсивного пылеотложения. Об этом свидетельствует самая крупная авария в Донбассе по катастрофическим последствиям, которая произошла на шахте им. Баракова (г. Краснодон) [15]. Взрыв пылевоздушной смеси распространился навстречу свежей струе вплоть до загрузочного бункера скипового ствола. На пути распространения взрыва сработало шесть сланцевых заслонов. Тем не менее пламя взрыва распространялось по сети выработок так, как будто этих заслонов не было. Хотя при отсутствии загазирования выработок и слоевых скопленений метана (в выработках аварийного участка были взрывоопасные отложения угольной пыли, но метан не обнаружен) достаточно сработать заслону, ближайшему к центру взрыва, чтобы его локализовать, т. е. погасить пламя. Единственным объяснением такого характера развития аварии является то, что взрывное горение распространялось в изолированном от выработки пространстве. Взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно распространялся по стационарной конвейерной линии, подконвейерное пространство в данном случае выполняло функцию проводника. Это свидетельствует о том, что уровень опасности взрыва метановоздушных смесей в конвейерных выработках очень высок и система взрывозащиты в этих выработках требует принципиального совершенствования. Существующие устройства, как видно, не позволяют полностью локализовать последствия взрыва. Необходимо разрабатывать способы и средства, позволяющие предотвратить воспламенение угольной пыли в подконвейерном пространстве. Недостаточно эффективными являются также применяемые в настоящее время методы определения параметров локализации и уборки угольной пыли в зависимости от производительности добычных машин, скорости воздушной струи, опасности пыли по взрываемости.

Конвейерный транспорт, в настоящее время, является наиболее распространенным средством доставки полезных ископаемых в горных выработках шахт и рудников. На многих (почти на всех) шахтах и рудниках применяется

система полной конвейеризации с доставкой полезного ископаемого от забоя до поверхности шахты. Общая протяженность выработок, оснащенных ленточными конвейерами, составляет в настоящее время на угольных шахтах Украины около 3000 км, а на рудных 10000 км [16]. Примерно 50 – 60 % магистральных выработок шахт оснащены высокопроизводительными мощными ленточными конвейерами [17]. За последние пять лет ленточными конвейерами оборудованы 868 км выработок, что составляет более 12% от общей протяженности выработок в действующих шахтах [9]. В этих условиях конвейерная транспортная система оказывает значительное влияние на окружающую среду в горных выработках, т.к. является источником вредных и опасных производственных факторов. Применение сплошной конвейеризации для доставки горной массы, увеличение скорости воздушной струи по выработкам способствует распространению пыли, практически по всей шахте. В конвейерных выработках наблюдается особенно высокое пылеотложение [18]. Отложение угольной пыли по длине конвейерной линии происходит по всей поверхности выработки за счет осаждения пыли из проходящего воздуха, под роликами холостой ветви, на роликоопорах, на предохранительных полках, а также на почве выработки за счет просыпания транспортируемого угля. Основная масса пыли при этом выпадает на участке длиной 20 – 30 м, примыкающей к пункту перегрузки. Интенсивность пылеотложения на роликоопорах и предохранительных полках определяется потерями угля, а также отслаиванием угольной мелочи и пыли с внутренней (нижней) поверхности рабочей ветви ленты. Полное пылеотложение в конвейерных выработках, оборудованных скребковыми конвейерами, достигает 1500, ленточными – 8000 г/(м³·сут) и более. Полное пылеотложение определяется главным образом потерями угля. Потери зависят от состояния конвейерных линий, нарушений режима эксплуатации конвейерных установок, качества стыковки секций скребковых конвейеров и достигают в отдельных случаях 3% от общего количества транспортируемого угля.

Ситовый и технический анализы образовавшейся просыпи в конвейерных выработках свидетельствуют о том, что в ней содержится более 40% пыли [19], которая в основном состоит из тонких фракций (60...95% проходит через сито № 200). При испытании на взрывчатость пыль, взятая даже с почвы и содержащая наиболее высокий процент золы от попавшей в нее инертной пыли, применяемой для осланцевания выработки, легко взрывалась. Техническим анализом установлено, что содержание летучих в пыли составляет от 17 до 27%.

Угольная пыль является не только одним из основных вредных производственных факторов, так как вдыхание ее может привести к профзаболеваниям, но и опасным фактором, так как образует с воздухом взрывчатые смеси. Наиболее опасные из них являются, так называемые, тройные смеси (угольная пыль + метан + воздух) с тем или иным соотношением горючих компонентов.

Главной особенностью тройных смесей является то, что взятые в отдельности невзрывчатые концентрации метана и угольной пыли в смеси с воздухом приобретают взрывчатые свойства. Присутствие метана даже в небольших количествах заметно снижает нижний концентрационный предел взрываемости (НКПВ) угольной пыли.

Известно, что вместе с пылью в горные выработки угольной шахты поступает 40% метана за счет газовыделений из отбитого угля транспортируемого от очистного забоя до поверхности. Наличие пыли в газовой среде снижает нижний порог взрываемости метана до 3-4%. За счет участия пыли во взрыве метана повышается сила взрыва, часто на порядок по сравнению со взрывом только метановоздушной смеси. Взрываемость пыли растет с увеличением степени дисперсности, поэтому угольная пыль в горных выработках шахты по мере удаления от источника пылеобразования потенциально более взрывоопасна [11].

Уровень безопасности в горных выработках определяется технической возможностью выполнения комплекса мероприятий с учетом требований директивных материалов [20], правил безопасности и инструкций [21, 22], а также других нормативных документов. Управление безопасностью производства на шахтах осуществляется на основе комплексного плана улучшения условий охраны труда и Единой системы организации работ по охране труда. Для различных процессов горных работ с учетом природной среды и горнотехнических условий разрабатываются комплексные мероприятия, которые должны обеспечивать технически достижимый уровень безопасности. Как показывает практика, применение всего комплекса мероприятий, направленных на обеспечение условий для безопасного труда, не гарантирует предупреждение взрывов пылегазовоздушных смесей [10].

Применение в настоящее время таких мер активного воздействия на уровень запыленности рудничной атмосферы как прогнозирование пылевыведения при основных технологических процессах; использование методов определения пылеотложения и его интенсивности; применение методов комплексного обеспыливания; определение взрывчатых свойств угольной пыли не в полной мере позволяют управлять фактором пылевыведения. Поэтому фактор пылевыведения будет и в дальнейшем сказываться на формировании взрывчатой среды [23]. При применении указанных методов появляется возможность предвидеть и существенно ограничить опасность пылевыведения, но не полностью ее ликвидировать. Согласно данным по экспериментально установленной периодичности применения пылевзрывозащитных мероприятий, приведенных в работе [23] следует, что допустимая нормативами периодичность во многих случаях недостаточна, и при ее выполнении часто не может быть обеспечена пылевзрывобезопасность шахтных выработок. Формированию источника воспламенения также способствуют организационно-личностные факторы и в первую очередь многочисленные и разнообразные нарушения правил эксплуатации электрического и механического оборудования. Информацию об уровне соблюдения правил технической эксплуатации оборудования дают остановки этого оборудования, произведенные при его неисправностях.

Угрожающие состояния как граница активного воздействия на процесс формирования взрывов метана и угольной пыли представляют последнюю фазу развития этого процесса. Это объясняется тем, что аварийные ситуации в реальных шахтных условиях практически трудно установить. Более того, кратковременные возникновения незащищенной взрывчатой среды и малоинтенсив-

ные выделения энергии трудно установить даже в лабораторных условиях. Поэтому в большинстве случаев факт существования производственной опасности определяется только после взрыва, в процессе проведения расследования [23].

Пылевзрывоопасность горных выработок шахты в основном определяется количеством отложившейся в них пыли, которая при переходе во взвешенное состояние может создать облако взрывоопасной концентрации [24].

Повышение пылевзрывоопасности выработок обуславливается также содержанием в них метана, так как нижний предел взрывчатости для пылегазовоздушных смесей значительно снижается (табл. 1.2) [18].

Таблица 1.2.

Нижние пределы взрывчатости для пылеметановоздушных смесей

Угольная пыль, г/м ³	5,0	10,0	20,0	30,0
Метан, %	3,0	2,0	1,0	0,5

Масса пыли, выносимая из лавы в конвейерные штреки, за сутки достигает 500 кг и более, причем на 1 т добычи выносится 0,02...1,8 кг пыли [25, 26].

В горизонтальных и наклонных откаточных выработках с транспортированием угля в вагонах пылеотложение незначительно по величине, имеет сравнительно небольшие колебания по длине выработок и составляет в среднем около 1 г на 1 м³ объема выработки и сутки [26].

В вентиляционных штреках и других выработках с исходящей струей воздуха наибольшее пылеотложение (300 г/(м³·сут) и более) наблюдается на участках, прилегающих к лавам. Длина этих участков 100-400 м и увеличивается с ростом скорости движения воздуха [27, 24].

В значительной степени пылеотложение в горных выработках зависит от влажности транспортируемого угля. Так, при транспортировании воздушно-сухого угля среднее пылеотложение на каждые 1000 т составляло 32,1 г/м³, а увлажненного – до 4,7-2,2 г/м³. Дальнейшее увеличение внешней влажности угля (свыше 5%) не приводит к заметному уменьшению пылеотложения [26].

Большое влияние на интенсивность пылеотложения в выработках оказывает процесс погрузки угля. Суточная интенсивность пылеотложения на 1 м³ выработки у погрузочных пунктов может достигать 80...700 г. Во всех случаях максимальное пылеотложение наблюдается в непосредственной близости от места погрузки и прослеживается на протяжении 5...10 м в сторону движения вентиляционной струи. При удалении от места погрузки интенсивность пылеотложения резко уменьшается и на расстоянии 15...25 м принимает значения, равные средним в откаточных выработках [26].

На состояние безопасности в горных выработках оказывает также влияние дисперсный состав витающей пыли, который во многом зависит от вида источников пыли и от способов борьбы с нею. Анализ этих данных показывает [28, 29, 30], что без применения средств пылеподавления процентное содержание частиц пыли размером менее 5 и 10 мкм составляет при работе очистных комбайнов до 3,8%, проходческих комбайнов до 4,2%, отбойных молотков до 5,1%, при передвижке секций механизированных крепей до 0,59%, на исходящих из лав вентиляционных струях до 4,6%, у пунктов перегрузки угля с конвейера

на конвейер до 4,0%. При использовании орошения за счет более эффективного подавления крупных частиц повышается процентное содержание наиболее мелких фракций пыли.

Дисперсность угольной пыли во многом определяет характер распространения ее по горным выработкам и распределение по периметру выработки при осаждении.

В МакНИИ выполнено обобщение экспериментальных данных о дисперсном составе витающей в воздухе пыли в горных выработках угольных шахт Донбасса по 3300 пробам, набранным при исследовании 42 шахтопластов, опасных по взрывам пыли [27]. Анализ дисперсности пыли показал, что средний медианный диаметр взвешенной пыли в горных выработках угольных шахт находится в пределах 16...50 мкм (табл. 1.3).

Наиболее высокий коэффициент вариации дисперсности пыли ($\pm 22\%$) наблюдается в забоях подготовительных выработок, где пыль крупнее, а меньшее его значение - на вентиляционных штреках ($\pm 12...13\%$). Коэффициент вариации дисперсности пыли линейно возрастает с увеличением медианного диаметра частиц.

Таблица 1.3.

Средний медианный диаметр взвешенной пыли в горных выработках угольных шахт

Наименование горных выработок	Средний медианный диаметр взвешенной угольной пыли, мкм
Очистные забои крутых пластов	30
Очистные забои пологих пластов	21...33
Забои подготовительных выработок	30...50
Пункты погрузки и перегрузки	28...41
Вентиляционные штреки вблизи лав пологих пластов	16...27
Вентиляционные штреки вблизи лав крутых пластов	16...23

Угольная пыль, отложившаяся в горных выработках, по дисперсному составу является взрывчатой, причем содержание наиболее опасной по взрыву фракции (менее 75 мкм) составляет, % по массе (табл. 1.4) [27]:

Таблица 1.4.

Содержание наиболее опасной по взрыву фракции (менее 75 мкм) в горных выработках

Наименование выработок	% по массе
Вентиляционные	69...100
Откаточные	78...80
Конвейерные	9...45
Погрузочные пункты в конвейерных выработках	78...93
Опрокидыватели	70...91
Сопряжения выработок	86...88

Дисперсный состав угольной пыли, отложившейся по выработкам, характеризуется большим разнообразием.

В практике промышленного обеспыливания [31] рассматривается в основном грубодисперсная пыль с частицами размером от 1 до 150 мкм. Многие авторы верхний предел размера ограничивают величиной 100 мкм [25].

В конвейерных штреках наблюдается закономерное изменение дисперсного состава пыли, отложившейся по длине выработки. При этом содержание пыли размером 75 мкм и более с удалением от лавы уменьшается. Доля остальных фракций либо остается практически постоянной, либо незначительно увеличивается. Примерно такой же закономерности подчиняется изменение дисперсного состава пыли, отложившейся в районе погрузочных пунктов лав пологих пластов. В остальных выработках определенной закономерности изменения дисперсного состава угольной пыли не наблюдается.

Как было отмечено, процесс накопления угольной пыли на различных поверхностях (горных выработок, оборудования и др.) является одним из основных факторов, обуславливающих пылевзрывоопасность горных выработок. Наиболее опасной с точки зрения взрыва или горения является часть поверхности горной выработки расположенной под конвейером, так как при переходе частиц пыли в аэрозольное состояние взрывное горение, как показывает опыт [15], распространяется в изолированном от выработки пространстве и взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно проходит по длине стационарной конвейерной линии. Подконвейерное пространство при этом, выполняет функцию проводника. Существующие защитные устройства в данном случае не позволяют полностью локализовать последствия взрыва. Поэтому выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особо опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли [27]. Кроме того конвейерные выработки, на всем их протяжении, относятся к группе горных выработок с большим и неравномерным пылеотложением [24]. При этом угольная пыль, отлагающаяся в них, по дисперсному составу является взрывчатой, причем содержание наиболее опасной по взрыву фракции (менее 75 мкм) составляет, до 93% по массе [26]. С увеличением расстояния по направлению движения вентиляционной струи содержание мелких фракций в отложениях пыли увеличивается. На рис. 1.1 представлен график изменения средневзвешенного диаметра отложившейся угольной пыли в вентиляционном штреке [27].

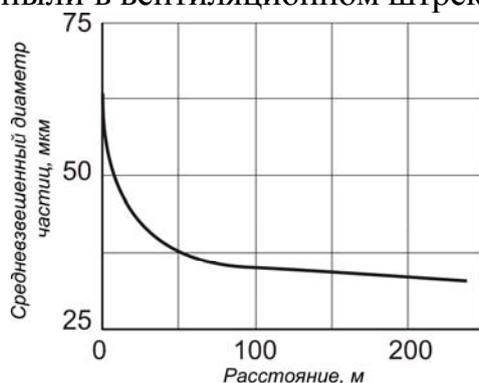


Рис. 1.1. Изменение средневзвешенного диаметра частиц угольной пыли, отложившейся в конвейерном штреке

Из графика видно, что с удалением от лавы значение средневзвешенного диаметра частиц уменьшается, т. е. отлагается более мелкая пыль. Таким образом, в конвейерных выработках по дисперсности отлагается сильно взрывчатая пыль.

Анализируя современное состояние вопроса взрывоопасности конвейерных выработок в подземных условиях горной промышленности, можно сделать вывод о том, что снизить уровень взрывоопасности конвейерной выработки можно по следующим основным направлениям:

- повышение эффективности способов и средств локализации и подавления угольной пыли при выполнении основных технологических операций (добыча, погрузка и транспортировка горной массы);
- разработка более надежных средств защиты от взрыва угольной пыли;
- разработка способов и средств предупреждения накопления пыли в подконвейерном пространстве.

1.2. Анализ состояния исследований по вопросам образования, распространения и отложения пыли в горных выработках шахт.

Исследования посвященные образованию, распространению и отложению пыли в горных выработках шахт и рудников начали интенсивно проводиться с внедрением высокопроизводительной техники в 50-х годах 20-го века. Основными, определившими направления научных исследований в данной области в этот период, являются работы академика А.А.Скочинского. В 1953г. по результатам исследований проф. А.С.Бурчакова было издано “Руководство для работников пылевентиляционной службы на угольных шахтах и проектных организаций по применению вентиляции как средства борьбы с пылью”, а в 1965г. проф. А.С.Бурчаковым и проф. А.И.Ксенофонтовой опубликована монография “Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах” [32].

В период с 1955 г интенсивно развивались исследования в области динамики аэрозолей, что объясняется большой практической ценностью учения об аэрозолях для исследования многочисленных природных и технических процессов и, в частности, для исследования процессов, происходящих в ограниченных горных выработках при движении воздушного потока [32].

Определяющий вклад в развитие теорий образования, распространения и отложения пыли в горных выработках шахт и рудников внесли ученые А.А. Скочинский, Г. И. Баренблатт, А.И. Ксенофонтова, А.С. Бурчаков, Н.А. Фукс, В.Н. Воронин, К.З. Ушаков, Б.Ф. Кирич, В.В. Дьяков, А.М. Карпов, А.П. Янов, В.С. Ващенко, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, В.И. Голинько, А.А. Гурич, О.И. Кашуба, В.Е. Колесник, П.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, Г.С. Гродель, Г.А. Поздняков, И.Ф. Ярембаш, К.В. Кузьминов. На основании исследований ими установлены законы выноса и рассеивания вредных примесей потоком воздуха, разработаны способы и средства снижения запыленности горных выработок и воздуха, а также дано научное обоснование процессов происходящих в турбулентных вентиляционных потоках переноса аэрозольных субстанций, разработа-

ны инженерные методы расчета параметров средств пылеподавления, способы и средства оперативного контроля условий труда по пылевому фактору.

В области динамики аэрозолей в горных выработках, по результатам исследований проведенных А.М. Карповым, В.В. Дьяковым, Б.Ф. Кириным, В.И. Голинько, В.И. Дремовым, С.Ю. Ерохиным, П.М. Петрухиным и др., стало возможным определить оптимальные места установки пылеулавливающего оборудования, а также оптимальные точки контроля концентрации пыли [33, 34, 35, 36, 37].

Важнейшим показателем вентиляционного потока является его транспортирующая способность, обеспечивающая эффективный вынос пыли. Впервые вопрос о движении пылевых частиц в рудничных воздушных потоках освещен В. Н. Ворониным. Несмотря на то, что численные коэффициенты, используемые этим автором, не могут претендовать на точность, приведенные им формулы достоверно отражают процессы подъема и уноса аэрозолей [38]. Известны работы Г.И. Беранблатта, М.А. Фукса, а применительно к рудничной пыли В.В. Дьякова, В.В. Скобунова, А.К. Красноштейна.

Исследования динамики пылевых частиц развивались этими учеными в следующих направлениях: углубление представлений об элементарных процессах, происходящих с пылинкой при ее движении в горной выработке; их экспериментальное изучение; анализ массовых пылевых процессов; попытки создания теории распространения пыли в горной выработке с учетом всех сопровождающих его факторов; исследование процесса распространения пыли.

Тем не менее, вопрос о движении пылевых частиц в турбулентных потоках по существу практически не решен до настоящего времени. Имеющиеся сегодня гипотезы не могут объяснить процессы, связанные с подъемом и уносом аэрозолей, следовательно, не позволяют описать процесс распространения пыли аналитически.

При исследовании динамики аэрозолей в горных выработках, определение характеристик движения взвешенных частиц в турбулентном потоке возможно только на основании общих уравнений механики турбулентного движения многокомпонентных сред. Однако в настоящее время этот вопрос недостаточно исследован и при рассмотрении явлений движения аэрозолей решения системы дифференциальных уравнений, у различных авторов, имеют разный вид.

Недостаточная изученность сложного механизма взметывания и оседания пыли приводит к качественному расхождению теоретических результатов с экспериментальными данными [29]. Причиной этому является то, что граничные условия при описании движения частиц в турбулентном потоке уравнением диффузии в потоке не отражают реального процесса.

Теоретически наиболее исследован вопрос о поведении отдельных пылевых частиц при различных режимах вентиляционного потока без учета их влияния на движение воздуха и других частиц. Достижения в этой области сводятся либо к определению траектории перемещения отдельных частиц, либо к изучению выпадения из воздушного потока под действием гравитационных сил и к вычислению на основе этого дальности их полета [32, 39 – 42].

Существует ряд работ, посвященных изучению процесса распространения пыли на физических моделях горных выработок [43 – 45].

Наряду с теоретическими и лабораторными исследованиями физических основ процесса распространения пыли в горных выработках большое внимание, особенно в последние годы, уделяется его изучению в шахтных условиях, которые чрезвычайно усложняют постановку, проведение и обработку экспериментальных данных. И все же рядом исследователей получены достаточно надежные результаты, касающиеся распределения концентрации пыли как по сечению, так и по длине горных выработок [46 – 50]. Обработка итогов исследований проводится в основном статистическим определением и построением, сглаживающими эмпирические зависимости, которые, как правило, справедливы для конкретных горнотехнических условий.

Как показывает анализ многочисленных изысканий, снижение концентрации пыли с удалением от источника авторы описывают экспоненциальной зависимостью [47, 51 – 55].

Исследования физико-химических свойств пыли под руководством проф. Б.Ф.Кирина стали основой для разработки и применения способов и средств пылеподавления [33]. Результаты выполненных работ по изучению влияния электрических, магнитных и акустических полей на пылевой аэрозоль позволили значительно повысить эффективность подавления.

Исследования по вопросам борьбы со взрывами угольной пыли и пылеподавления ведутся по трем основным направлениям [56]:

- создание способов и средств, препятствующих пылеобразованию и пылевого облака;
- разработка мероприятий по предупреждению появления источников воспламенения угольной пыли;
- локализация и подавление уже возникших взрывов пыли.

Способы и средства, препятствующие образованию пыли и пылевого облака, направлены на борьбу с непосредственной причиной взрыва и на устранение только пылевой составляющей опасности взрыва. Они не обеспечивают полную взрывобезопасность, но при этом являются наиболее действенным способом повышения пылевзрывобезопасности.

Разработка мероприятий по предупреждению появления источников воспламенения угольной пыли относится, прежде всего, к вопросам модернизации применяемого технологического оборудования и методам его контроля, а также правилам ведения горных работ и требованиям безопасности.

Локализация и подавление возникших взрывов – это быстрые и эффективные меры по предотвращению последствий нарушений требований безопасности, которые могут быть реализованы с помощью противоаварийных автоматических технических систем по локализации взрывов (СЛВА), предназначенных для подавления взрывов метана и угольной пыли в начальной стадии их развития по вспышке в зоне контроля [57].

Почти во всех явлениях, связанных с аэрозолями, имеет место взаимное движение частиц аэрозоля и их движение относительно тел и поверхностей, расположенных внутри аэрозоля или заключающих в себе рассматриваемый аэрозоль. При этом частицы аэрозоля либо осаждаются на различные поверхности под действием силы тяжести или электростатических и пульсационных сил,

либо наоборот переходят в аэрозольное состояние под действием импульсных сил набегающего потока воздуха. Поэтому исследование осаждения, налипания и сдувания частиц аэрозоля играет существенную роль в изучении многих процессов, таких например как [32]:

- перевод взрывной волной в аэрозольное состояние ранее осевшей пыли;
- снижение запыленности горных выработок и воздуха (средствами вентиляции, осаждением пыли фильтрами, местным улавливанием пыли, связыванием пыли, уборкой пыли и др.);
- пылединамика в пространстве ограниченных выработок для оценки запыленности атмосферы.

В научно-исследовательских работах по механике аэрозолей Н.А. Фукса [58], В. Н. Воронина [38] и Г. И. Баренблатта [40] были заложены основы гравитационной теории осаждения частиц, в которой учитывалось обратное воздействие движущихся частиц на поток.

Для случая гравитационного осаждения В. Н. Ворониным [38] предложена формула, описывающая динамику изменения запыленности воздуха с расстоянием

$$N = N_0 \exp\left(-k_T \frac{l v_B}{h v}\right), \quad (1.1)$$

где N_0 – начальная запыленность, г/м³;

k_T – коэффициент, учитывающий турбулентное перемешивание;

v_B – скорость витания частицы, м/с;

h – средняя высота выработки, м;

l – расстояние от источника пылеобразования;

v – скорость движения воздуха;

v_B – скорость витания частицы, м/с.

Для описания изменения концентрации взвешенной в воздухе пыли, вызванного адгезией частиц на поверхности выработки, этим же автором предложена формула

$$N = N_0 \exp\left(-0,02 \cdot m^* \frac{P_B l}{S_B R_1} \sqrt{\frac{\rho_{II} q_B r^2}{4 \cdot S_B d_c}}\right), \quad (1.2)$$

где m^* – вероятность адгезии ударившейся об стойку пылинки;

R_1 – продольный калибр, м;

d_c – диаметр стойки крепления, м;

ρ_{II} – плотность вещества частицы, кг/м³;

P_B, S_B – соответственно, периметр и площадь сечения выработки;

q_B – количество прошедшего воздуха, м³;

r – радиус частицы, м;

d_c – диаметр стойки крепления, м.

Согласно последним исследованиям закон изменения концентрации пыли по длине выработки описывается формулой

$$N_i = \sum N_{0i} \exp \left[-\frac{l}{R_g} \left(a + b \frac{v_{Bi}}{v} \right) \right], \quad (1.3)$$

где N_{0i} – начальная концентрация i -й фракции, г/м³;
 v_{Bi} – скорость витания частицы i -й фракции, м/с;
 a, b – постоянные.

Формулы (1.1) – (1.3) не учитывают перехода частиц пыли в аэрозольное состояние в результате ее выдувания из отбитого угля и сдувание ее со стенок выработок. Эти формулы не учитывают также влияние конвейера на процесс осаждения пыли по длине конвейерной выработки.

Исходя из экспериментальных исследований авторами работ [59, 60] предложены эмпирические формулы для расчета концентрации по длине выработок. Однако эти выражения не являются универсальными, требуют экспериментального определения коэффициентов в выражении и не дают оценки изменения дисперсного состава пыли. Вопрос изменения дисперсного состава пыли при движении воздуха в выработках под воздействием гравитационных сил рассмотрен в [61]. Однако полученные выражения и порядок расчета настолько сложен, что результаты не представляют практического интереса.

Образование, распространение и отложение пыли взаимосвязаны, обуславливаются горнотехническими и горно-геологическими условиями при ведении горных работ. В связи с этим возникает необходимость в прогнозировании пылеотложения во время эксплуатации объекта (выработки с конвейером). Такое прогнозирование может быть осуществлено на основании закономерностей изменения распределения или параметров функции в процессе распространения пыли.

Весьма существенное значение при оценке взрывчатости и других свойств пыли имеет ее дисперсный состав. Под дисперсным составом пыли понимают количественное соотношение частиц различных размеров. Все промышленные пыли полидисперсны. Поэтому для практических целей важно знать распределение частиц по размерам в пылевом потоке.

Правильно определить содержание и обосновать место отложения наиболее взрывоопасной фракции аэрозоля можно только при известной функции распределения пыли и знании закономерностей изменения распределения или параметров функции в процессе распространения рудничных аэрозолей.

Дисперсный состав пыли является наиболее изменчивым и трудно предсказуемым фактором. В практике дисперсионного анализа пыли и порошкообразных материалов дисперсный состав принято характеризовать функцией распределения $P(\delta)$ массы материала по диаметрам частиц или соответствующей плотностью распределения $f(\delta)$. Иногда используют функцию и плотность распределения числа частиц по размерам $P_n(\delta)$ и $f_n(\delta)$ и другие характеристики. Обычно такое распределение для каждого конкретного случая устанавливается экспериментально одним из известных методов дисперсионного анализа [62] и выражается табличными данными или кривыми распределения.

Среди специалистов в области пылеподавления и контроля запыленности рудничной атмосферы нет единого мнения в вопросе о виде функций распределения рудничных аэрозолей. Ряд исследователей [63, 64, 65] придерживаются мнения, что пыль образующаяся в результате механического разрушения горных пород, удовлетворительно характеризуется логарифмически нормальным законом распределения, функция которого имеет вид [66]

$$P(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \int_{-\infty}^{\lg \delta} \exp \left[-\frac{(\lg \delta - \lg \delta_{50})^2}{2 \lg^2 \sigma} \right] d \lg \delta, \quad (1.4)$$

где δ_{50} – масс-медианный диаметр;

$\lg \sigma$ – среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

Часто для вычисления искомой функции вводят новый аргумент y , который называют нормированной нормально распределенной величиной

$$y = \frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma}. \quad (1.5)$$

После замены аргумента функция имеет вид

$$P(\delta) = F(y) = F \left(\frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp \left(-\frac{y^2}{2} \right) dy. \quad (1.6)$$

Для построения графика функции распределения используют логарифмически вероятностную координатную сетку. В этой сетке график имеет вид прямой, по углу наклона которой определяют значение σ , а по величине δ , в точке пересечения графика с $P(\delta) = 0,5$ – значение δ_{50} .

Анализ многочисленных данных экспериментальных исследований дисперсного состава аэрозолей как угольных так и рудных шахт показывает, что практически ни один график распределения, построенный в логарифмически вероятностной координатной сетке не имеет вида прямой, что свидетельствует о неприменимости логарифмически нормального закона распределения для описания рудничных аэрозолей. Причина этого заключается в том, что указанный закон распределения теоретически доказан Колмогоровым для материалов подвергавшихся измельчению в течении достаточно длительного времени, что не соответствует механизму образования рудничных аэрозолей. С другой стороны, указанное распределение приемлемо для описания ненарушенного состава пыли. Если же состав нарушен аэродинамическими процессами, связанными с витанием пыли в воздухе, то, как считает Коузов, имеет место односторонне усеченное логарифмически нормальное распределение или распределение отвечающее формуле Ромашова [66].

Функция, отвечающая распределению по исправленной формуле Ромашова имеет вид

$$P(\delta) = 2 \cdot \Phi(y) - \frac{2}{3} \cdot y(y^2 + 3)f(y), \quad (1.7)$$

где

$$y = \sqrt{2aB} \delta;$$

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy;$$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right);$$

$$B = \frac{1}{18} \frac{\gamma g}{\mu};$$

a – постоянная величина, зависящая от времени образования пыли;

γ – плотность частиц пыли;

μ – динамическая вязкость воздуха.

Несмотря на кажущуюся сложность зависимости (1.7), она обладает существенными преимуществами перед логарифмически нормальным законом, так как при известной плотности частиц аэрозоля параметр y определяется только величиной a , что позволяет достаточно просто восстановить закон распределения по результатам наблюдений. Кроме того, функция распределения числа частиц по диаметрам имеет простой вид

$$P_h(\delta) = 1 - \exp(-aB\delta^2). \quad (1.8)$$

Это позволяет достаточно просто установить параметры распределения по результатам электронно-микроскопических исследований и при применении счетчиков частиц. Для построения графиков распределения рекомендуется использовать координатную сетку по оси ординат которой откладывают значение y , а проставляют соответствующие ему значения $P(\delta)$, а по оси абсцисс – значение δ . Построенные в такой координатной сетке кривые распределения изображаются прямой, проходящей через начало координат с угловым коэффициентом $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2aB}$. На рис. 1.2 построены кривые распределения для пыли угольных шахт с максимально и минимально возможным содержанием тонкой пыли (70% и 5% соответственно для частиц с $\delta < 10 \mu\text{км}$) и наиболее вероятным содержанием (35%). Сопоставление данного распределения с распределением, характерным для пыли, встречающейся при добыче и переработке угля [27] построенным в двойной логарифмической координатной сетке (рис. 1.3) показывает, что распределение Ромашова противоречит опытным данным, особенно в области малых размеров частиц. Причина того, как было установлено при анализе вывода формулы Ромашова, в допущенной в начале вывода неточности, заключающейся в том, что не было учтено начального распределения частиц по скорости витания.

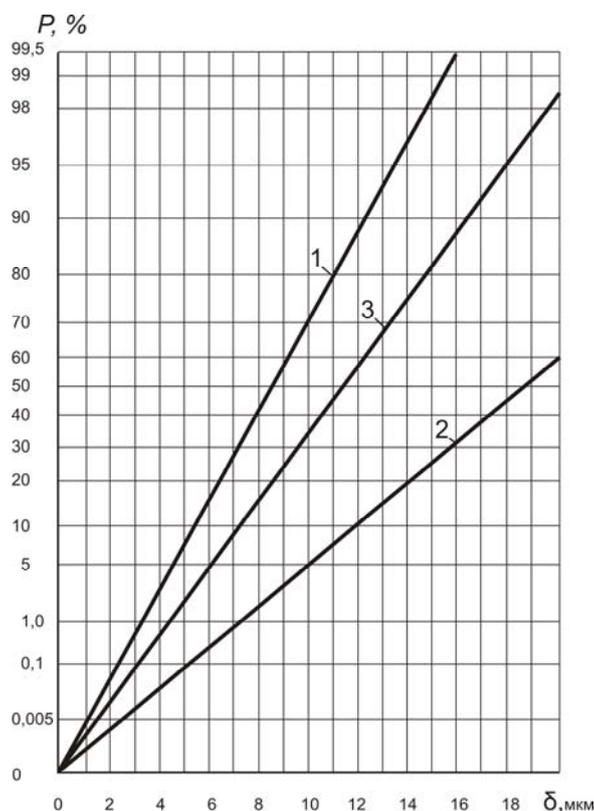


Рис. 1.2. Распределение массы частиц пыли по исправленной формуле Ромашова: 1 – содержание частиц с $\delta=10\mu\text{м}$ – 70%; 2 – содержание частиц с $\delta=10\mu\text{м}$ – 5%; 3 – наиболее вероятное содержание частиц $\delta=10\mu\text{м}$.

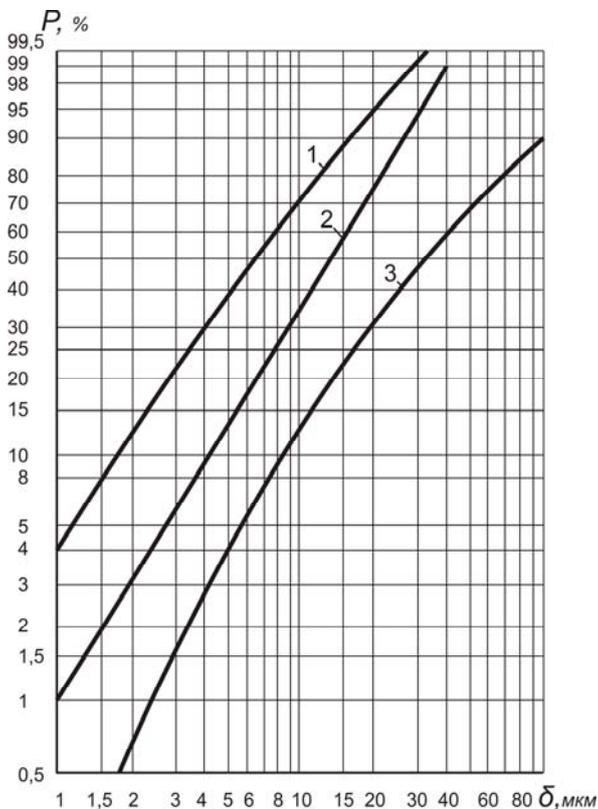


Рис. 1.3. Дисперсный состав пыли угольных шахт по данным МакНИИ: 1, 3 – кривые, ограничивающие область распределения; 2 – наиболее часто встречающееся распределение.

Среди эмпирических формул распределения наиболее признанным и широко применяемым является распределение Розина-Раммлера [66], в соответствии с которым

$$P(\delta) = 1 - \exp(-b\delta^a), \quad (1.9)$$

$$f(\delta) = ba\delta^{a-1} \exp(-b\delta^a), \quad (1.10)$$

где a и b – постоянные величины определяемые по опытным данным.

Величины коэффициентов могут изменяться в значительных пределах в зависимости от способа измельчения и применяемого оборудования. Распределение является двухпараметрическим, что усложняет процесс установления функции распределения при применении счетчиков частиц.

Рассмотренные ранее теоретические и эмпирические формулы распределения получены в основном для продуктов измельчения. При выводе формул рассматривалось обычно измельчение продуктов в течение длительного промежутка времени, а данные ситовых анализов по результатам которых получены эмпирические формулы, относятся прежде всего к продуктам измельчения.

Процесс образования рудничной пыли существенно отличается от процесса измельчения и является, по сути дела, только его начальной фазой.

1.3. Анализ способов и средств повышения пылевзрывобезопасности горных выработок, оборудованных конвейерным транспортом.

Основным условием успешного ведения работ по борьбе со взрывами угольной пыли в шахтах является применение эффективных мер по предупреждению пылеобразования и снижению запыленности воздуха при всех производственных процессах угледобычи. Для этого разработан ряд способов и средств, включенных в комплекс мероприятий по обеспыливанию, который в настоящее время применяется на всех шахтах. При этом в значительной степени снижается запыленность воздуха, а следовательно, и пылеотложение по сети горных выработок. Однако, даже при очень низком пылеобразовании, с течением времени в горных выработках может отложиться взрывоопасное количество пыли [24].

До последнего времени основным способом предупреждения и локализации взрывов угольной пыли в шахтах была сланцевая защита (осланцевание и сланцевые заслоны). Опыт применения сланцевой защиты в современных шахтных условиях вскрыл целый ряд неустранимых недостатков. Она не обеспечивает взрывозащиту мест интенсивного пылеотложения. Эффективность ее резко снижается в условиях высокой относительной влажности воздуха, вызванной применением комплексного его обеспыливания, основанного на использовании воды. Кроме того, применение инертной пыли приводит к искусственному увеличению запыленности воздуха по сети горных выработок [24].

С целью уменьшения потенциальной опасности взрыва угольной пыли, а также для увеличения срока защитного действия способов предупреждения ее взрывов и сокращения затрат на пылевзрывозащиту целесообразно применять

меры по снижению интенсивности пылеотложения в горных выработках. Особенно это полезно делать на вентиляционных штреках, куда из лавы выносятся значительное количество угольной пыли, для чего в сочетании с комплексным обеспыливанием воздуха при всех процессах угледобычи могут быть использованы водяные завесы и пылеулавливающие жалюзийные перегородки [24].

Величина пылеотложения в конвейерных выработках достигает более 8000 г/м³сут. Поэтому мероприятия по предупреждению взрывов угольной пыли в таких выработках могут быть эффективными только при применении мер борьбы с пылеобразованием и пылеотложением [67].

Для снижения запыленности воздуха и отложения пыли в конвейерных выработках в работах исследователей [67 – 70] предложены различные способы и средства, основными из которых являются: увлажнение угля в массиве и при его выемке; поддержание оптимальной (по пылевому фактору) скорости движения воздуха; качественное производство монтажа конвейеров (не допуская их искривлений и перекосов); установка в местах загрузки конвейеров углем специальных желобов или приспособлений, обеспечивающих распределение транспортируемого угля по центру несущего органа равномерным слоем, не превышающим нормы производительности конвейеров; очистка нижней поверхности холостой ветви ленточных конвейеров у разгрузочной головки и верхней поверхности у натяжного барабана специальными очистителями.

Перечисленные мероприятия позволяют значительно снизить пылеотложение (на 90...95%) [67]. Однако, несмотря на эффективность этих мероприятий, взрывоопасное количество пыли отлагается за очень короткое время. Кроме того, применение гидрообеспыливания с требуемыми его параметрами приводит, в отдельных случаях, к переувлажнению угля, а, следовательно, и к потере его качества, что влечет за собой штрафы за нарушение стандарта [71]. В этих условиях для предупреждения взрывов отложившейся угольной пыли наиболее целесообразно производить увлажнение и уборку угольной мелочи, просыпавшейся на почву и элементы конструкции конвейерной установки, а также обмывку боков и кровли выработок водой или раствором смачивателя.

Выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особо опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли [11], так как взрыв пылевоздушной смеси может беспрепятственно распространяться по стационарной конвейерной линии и подконвейерное пространство в данном случае выполняет функцию проводника. Таким образом, система взрывозащиты конвейерных выработок требует принципиального совершенствования. Существующие устройства не позволяют полностью локализовать последствия взрыва, о чем свидетельствует самая крупная авария в Донбассе по катастрофическим последствиям, которая произошла на шахте им. Баракова в г.Краснодоне [15].

В работе [15] для локализации очага воспламенения в подконвейерном пространстве предлагается устройство в виде контейнера (рис. 1.4) выполненного с продольными и поперечными разъемными кольцами и наполненного негорячим упругим материалом, способным при расширении заполнять заданный объем. Данное устройство действует длительное время и способно локали-

зовать повторные источники воспламенения. Устройство размещают непосредственно под конвейер. При появлении очага воспламенения индикатор 1 (датчики инфракрасного или ультрафиолетового излучения) реагирует и подаёт электрический импульс в электродетонатор 2. От взрыва электродетонатора и скреплённого с ним детонирующего шнура 3 поперечные 4 и продольные 5 кольца в камере 6 рассоединяются и освобождают упругий материал 7, который, расширяясь, заполняет подконвейерное пространство. В результате этого очаг воспламенения подавляется, а возможные источники воспламенения изолируются от рудничной атмосферы инертной средой. На рис. 1.4 представлена предлагаемая схема взрывоподавляющего устройства.

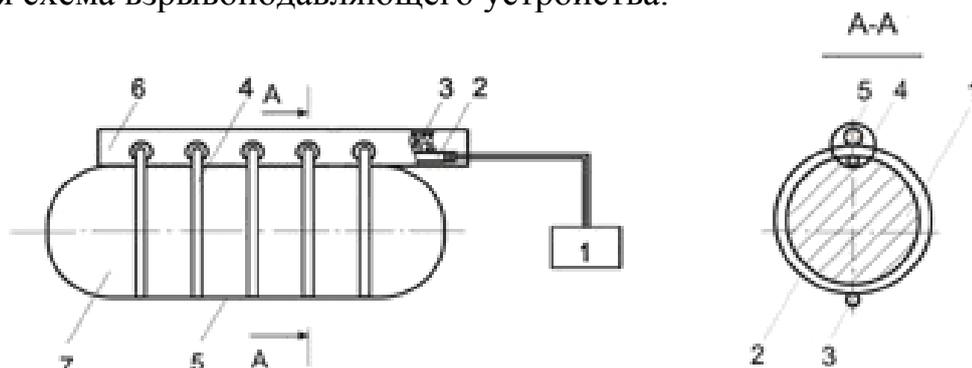


Рис. 1.4. Схема взрывоподавляющего устройства: 1 – индикатор; 2 – электродетонатор; 3 – детонирующий шнур; 4 – поперечные кольца; 5 – продольные кольца; 6 – камера; 7 – упругий материал.

Предлагаемое устройство не снижает уровень пыле- взрывоопасности конвейерной выработки, а только предотвращает распространение взрыва по подконвейерному пространству. Кроме того, монтаж предлагаемого взрывоподавляющего устройства в весьма стесненных условиях подконвейерного пространства очень сложен и трудоемкий процесс.

Известны технические решения [72], в которых с целью обеспечения взрывобезопасности в горных выработках предлагается уголь, поступающий с лавного конвейера, загружать в мягкую цилиндрическую оболочку, свернутую в виде спирального тора, наружный конец которой герметично закрыт, заполнить ее на 80-90% от объема, герметично закрывать второй конец мягкой цилиндрической оболочки и транспортировать до поверхности. Однако предлагаемый способ требует коренных преобразований и значительных материальных затрат в системе транспортирования горной массы и для действующих шахт неприемлем.

В условиях многих шахт (шахтах с минусовой температурой воздуха, с большой глубиной и с пучащими боковыми породами, а также с высокой обводненностью) применение воды нежелательно, а в отдельных случаях практически невозможно. В этих условиях наиболее приемлем сухой способ уборки отложившейся пыли, принцип которого состоит в ее отсосе или сдувании с поверхностей с последующим улавливанием. При высоком качестве и соблюдении периодичности сухая уборка может применяться как самостоятельный спо-

соб обеспечения пылевзрывобезопасности выработок. Производится она вручную и механизировано [11].

Уборка осевшей пыли путем обметания предусмотрена Правилами безопасности и является вспомогательным мероприятием при осланцевании выработок. Она применяется в местах интенсивного пылеотложения для удаления с поверхности выработок большого количества накопившейся осланцованной пыли. При ручной уборке путем сметания пыли на почву с последующей погрузкой в вагонетки на поверхности выработки может оставаться угольная пыль во взрывоопасном количестве. Недостатком ручного способа уборки, помимо низкой эффективности, является высокая запыленность воздуха, особенно при больших скоростях его движения. В связи с этим ручная уборка путем обметания выработок как самостоятельный способ предупреждения взрывов пыли применяться не может. Для снижения запыленности воздуха перед сметанием пыли поверхность выработки необходимо орошать водой или растворами смачивателей [11].

Механизированный способ сухой уборки известен давно, однако практическое применение он может получить лишь при создании надежной конструкции машины. Предложенный в Великобритании вакуум-фильтровальный агрегат, работающий на принципе пылесоса, состоит из вакуумной установки производительностью $21 \text{ м}^3/\text{мин}$ и пылеуловителя (циклоны и матерчатый фильтр). Эффективность очистки отсасываемого воздуха 90-95 %. Качественную уборку отложившейся пыли этот агрегат обеспечивает только с относительно гладкой поверхности выработки [11].

Для уборки пыли в ФРГ предложена установка, основным элементом которой - кольцевой эжектор. За счет сверхзвуковой скорости струи сжатого воздуха в щели эжектора во всасывающей патрубке создается высокий вакуум, благодаря которому через сопло засасывается не только отложившаяся пыль, но и куски угля, породы и др. В нагнетательный патрубок подается вода. При этом в результате интенсивного перемещения запыленного воздуха и тонкодиспергированной воды происходит эффективное увлажнение пыли. Увлажненная пыль улавливается в пылеуловителе и выбрасывается в вагонетку, а очищенный воздух поступает в выработку. Производительность таких установок сравнительно мала и их можно применять в выработках небольшой протяженности [11].

Для уборки пыли в горных выработках, имеющих значительную протяженность, может быть использован сухой способ, основанный на сдувании с последующим улавливанием. Агрегат, работающий на данном принципе, был разработан Донгипроуглемашем совместно с МакНИИ. Он состоит из пылесдувающего механизма и пылеулавливающей установки. Пылесдувающий механизм представляет собой платформу, на которой смонтирован центробежный вентилятор. Он приводится в действие электродвигателем постоянного тока, питание которого осуществляется от аккумуляторной батареи электровоза. Рабочим органом пылесдувающего механизма является сопло, конструктивно выполненное в виде двух вращающихся патрубков. Скорость воздуха на выходе из сопла может изменяться от 16,5 до 64 м/с - в зависимости от положения ши-

беров на патрубках. Этим достигается качественное сдувание пыли в различных условиях по всему периметру выработки [18].

Пылеулавливающая установка состоит из платформы, на которой смонтирован насос 1В-20/10 подачей $16 \text{ м}^3/\text{ч}$, напорного фильтра и коллектора с семью шлангами диаметром 19 мм. На каждом шланге имеется по три плоскоструйных форсунки. В месте улавливания пыли форсунки размещаются по сечению выработок, к ним от насоса подается вода, создавая водяную завесу. Резервуаром для воды служат три-четыре соединенных между собой вагонетки. От бортов каждой вагонетки к крепи подвешивается прорезиненная ткань, по которой вода стекает в вагонетки для рециркуляции. Эффективность пылеулавливания 90-96 %. Осевшая на поверхности горной выработки пыль сдувается пылесдувающим механизмом, который перемещается электровозом в направлении движения воздушного потока. Приведенная во взвешенное состояние пыль уносится воздушным потоком по выработке и на некотором расстоянии улавливается в пылеулавливающей установке, а очищенный от пыли воздух движется дальше. В процессе уборки пылеулавливающая установка остается неподвижной. Уборка пыли производится участками, длина которых составляет 1000 м при пылеотложении $30\text{-}40 \text{ г}/\text{м}^3$ и скорости движения воздуха более 1 м/с, 500 м - при меньшей скорости. Производительность агрегата (скорость передвижения) должна регулироваться в зависимости от запыленности окружающего воздуха. Так, при пылеотложении до $40 \text{ г}/\text{м}^3$ и скорости вентиляционной струи более 1 м/с агрегат может работать в безопасных условиях со скоростью 0,4-0,6 м/с и более. При меньшей скорости вентиляционной струи скорость агрегата составляет не более 0,2 м/с. Эффективность пылеуборки 90-95 %. Остаточное пылеотложение после однократной обработки $3\text{-}4 \text{ г}/\text{м}^3$. С увеличением пылеотложения в выработках эффективность пылеуборки снижается. Для повышения качества уборки необходимо производить обработку выработки в несколько приемов. Уборка в выработках с сухой почвой затруднительна, так как пыль выдувается из всей своей толщи. Эта задача решается путем орошения почвы водой, 0,2 %-ным водным раствором смачивателя ДБ или растворами гигроскопических солей при расходе $1\text{-}1,5 \text{ кг}/\text{м}^2$. На агрегате работают два машиниста электровоза, один из них обслуживает пылесдувающий механизм, другой - пылеулавливающую установку.

Основные недостатки агрегата - низкая маневренность, малая производительность, потребность в многократной обработке выработки при пылеотложении более $30\text{-}40 \text{ г}/\text{м}^3$ [28].

На принципе действия рассмотренного агрегата в Бельгии была разработана установка для сухой уборки пыли в горных выработках. Установка состоит из приспособления для сдувания пыли и пылеуловителя. Для сдувания осевшей на стенках выработки пыли используется специальная вертушка, состоящая из четырех вращающихся вокруг горизонтальной оси насадок, через которые на поверхность выработки поступает сжатый воздух под давлением $4 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Удовлетворительное сдувание пыли с поверхности выработки достигается при расстоянии насадок до очищаемой поверхности не более 0,4 м. Частота вращения вертушки 42 мин^{-1} . Скорость очистки поверхности выработок от пыли око-

ло 1 м/мин, причем в двухпутевых выработках за один проход машины обеспечивается ее сдувание только с половины поверхности выработки. Поэтому полную очистку таких выработок необходимо производить в два приема. Принцип действия пылеуловителя с S-образным каналом аналогичен работе трубы Вентури. Запыленный воздух, проходя по каналу, увлекает тонкий слой воды, образующей водяную завесу. При этом частицы пыли улавливаются при столкновении с каплями воды или под действием центробежной силы. Загрязненная вода отстаивается и возвращается в пылеуловитель. Потери воды составляют примерно 0,25 кг/мин при скорости аспирации воздуха 1 м³/с. Такой пылеуловитель производительностью 4,5 м³/с обеспечивает очистку воздуха на 98-99% [19]. К числу существенных недостатков установки относится низкая производительность пылеуловителя. В выработках, по которым проходит воздуха больше, чем производительность пылеуловителя, уборку производить не представляется возможным ввиду больших утечек запыленного воздуха.

Заявлены патенты на различные конструкции устройств для очистки подконвейерного пространства [73 – 77]. Наиболее эффективными из них являются следующие.

Устройство для очистки подконвейерного пространства (рис. 1.5, 1.6), включающее источник высокоскоростной струи газов, смонтированный на ходовой части с одной стороны относительно продольной оси грузонесущего органа конвейера. Приемная часть желоба имеет в поперечном сечении корытообразную форму, а выходная часть – форму замкнутого контура и размещена по направлению движения грузонесущего органа конвейера.

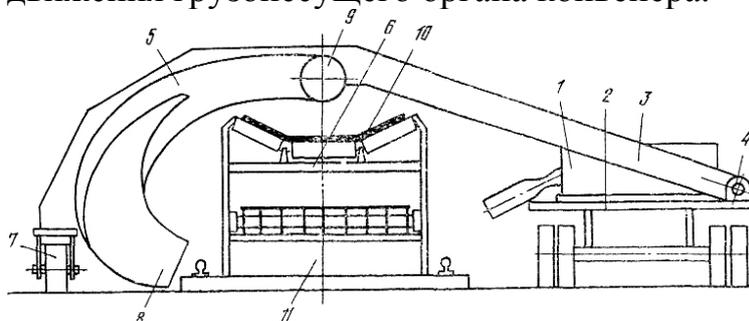


Рис. 1.5. Устройство для очистки подконвейерного пространства

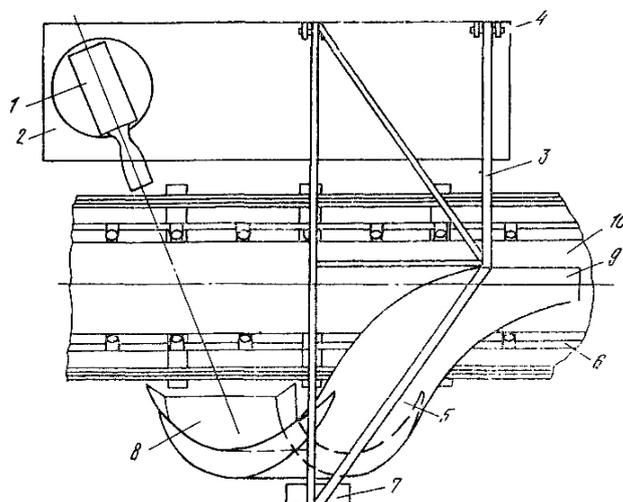


Рис. 1.6. Устройство для очистки подконвейерного пространства

Устройство работает следующим образом. Источник 1 высокоскоростной газовой струи направляет струю газов в подконвейерное пространство 11. Струя газов, захватывая частицы горной массы, попадает в приемную часть 8 фигурного желоба 5. Горная масса, захваченная высокоскоростной струей газов, поднимаясь по фигурному желобу 5, выходит из его выходной части 9 и попадает на грузонесущий орган 10 конвейера 6, имея скорость движения и траекторию, близкую к скорости движения и траектории грузонесущего органа 10 конвейера 6. Устройство перемещается вдоль конвейера 6 с помощью ходовой части 2 и опорного катка 7 навесной рамы 3 и очищает подконвейерное пространство 11 на всем протяжении конвейера 6.

Предлагается также устройство для уборки просыпи и пыли (рис. 1.7).

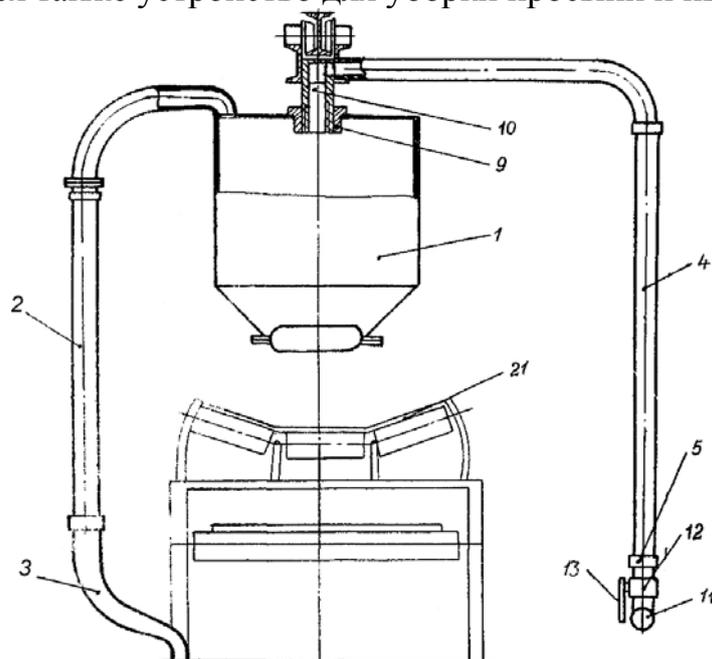


Рис. 1.7. Устройство для уборки просыпи и пыли

Устройство состоит из бункера 1 с закрепленным на нем транспортным трубопроводом 2 с соплом 3 и гибким трубопроводом 4, оканчивающимся муфтой 5, которые смонтированы на раме тележки 6, перемещающейся с помощью привода 7 по монорельсу 8. В крышке бункера 1 приварена резьбовая втулка 9, другая резьбовая втулка 10 приварена к раме тележки 6. Трубопровод 11 с помощью отводов, содержащих муфту 12 и пробковый кран 13, соединяет бункер 1 с установленными стационарно циклоном 14, фильтром 15, вентилятором 16 и электродвигателем 17. В нижней части бункера 1 установлена крышка 18, а в нижней части циклона 14 – крышка 19. Циклон 14 и бункер 1 установлены на раме тележки 6 и соединены между собой трубопроводом 20, при этом возможен поворот бункера 1 с транспортным трубопроводом 2 на 300°.

Устройство работает следующим образом. Атмосферный воздух вместе с частицами материала засасывается через сопло 3 в транспортный трубопровод 2 и попадает в бункер 1, в котором вследствие потери скорости и действия силы тележки материал осаждается в нижней его части, а воздух проходит по гибкому трубопроводу 4 и через трубопровод 11 с отводами поступает в центробеж-

ный циклон 14 по касательной и перемещается по спирали. Материал, прижимаемый центробежной силой к стенке циклона, теряет скорость, опускается под действием силы тяжести в его нижнюю часть, а очищаемый воздух попадает в фильтр 15, после которого окончательно очищенный проходит через вентилятор 16 и выводится в атмосферу. Разгрузка накопленного материала из бункера 1 и центробежного циклона 14 осу крышек 18 и 19 в любые приемные емкости и на ленточный транспортер 21.

Общим недостатком этих конструкций является их громоздкость и, в связи с этим, невозможность использования в подземных стесненных условиях конвейерных выработок.

В заключение следует отметить, что механизированный способ сухой уборки пыли является перспективным мероприятием по предупреждению взрывов. По мере совершенствования пылеуборочных агрегатов этот способ может найти широкое применение в угольных шахтах. Совершенствование в первую очередь следует вести в направлении создания самоходных высокоманевренных агрегатов.

Таким образом, на основании анализа состояния безопасности и условий труда в горных выработках оборудованных конвейерным транспортом, анализа результатов исследований по вопросам образования, распространения и отложения пыли в горных выработках шахт и рудников, а также способов и средств повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок оборудованных конвейерным транспортом можно сделать следующие выводы.

В угольной промышленности Украины имеет место большое количество подземных аварий, значительную часть которых составляют взрывы пыли, которые являются наиболее тяжелыми по своим последствиям среди опасностей горного производства и в большинстве случаев носят характер катастроф.

Выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особо опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли.

Процессы образования, распространения и отложения пыли в конвейерных выработках шахт и рудников не изучены в достаточной степени.

Широкое применение в настоящее время различных способов и средств борьбы с пылью обуславливает необходимость оценки их влияния на состояние безопасности в конвейерных выработках, которое во многом зависит также, от вида источников пыли, ее дисперсного состава и интенсивности пылеотложений в подконвейерном пространстве.

Предложенные ранее методы определения параметров пылеотложений по длине горных выработок не описывают процессов, связанных с изменением величины накопления пыли в подконвейерном пространстве, что не позволяет производить точную оценку степени его влияния на величину запыленности воздуха в конвейерной выработке и, следовательно, учитывать это влияние при разработке способов и средств снижения интенсивности пылеотложений в подконвейерном пространстве.

В настоящее время накоплен большой опыт применения способов и средств снижения интенсивности пылеотложений в горных выработках оборудованных конвейерным транспортом, однако, несмотря на их высокую эффективность, взрывоопасное количество пыли отлагается за очень короткое время.

ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ, ОБОРУДОВАННЫХ КОНВЕЙЕРНЫМ ТРАНСПОРТОМ

2.1. Анализ процесса пылеобразования при добыче и транспортировке полезных ископаемых.

Источниками образования аэрозолей в горных выработках шахт и рудников являются процессы, связанные с добычей и транспортировкой полезного ископаемого.

Наибольшее пылеобразование происходит в очистных забоях при выемке угля комбайнами, при работе которых до 50% угля превращается в пыль. Запыленность воздуха при отсутствии средств борьбы с пылью в зависимости от естественной влажности угля составляет 50...750 мг/м³. В отдельных случаях она достигает 2000...2500 мг/м³ и более [24].

Рассмотрим процесс образования рудничных аэрозолей считая, что основными процессами, обуславливающими образование мелкодисперсных частиц пыли при добыче полезных ископаемых, являются процессы трения режущего инструмента о поверхность массива и, в основном, взаимное трение кусков ископаемого друг о друга при разрушении массива и их падении, а также при транспортировке.

Очевидно, что дисперсный состав пыли, прежде всего, зависит от вышеуказанных процессов образования мелких фракций в продуктах разрушения массива, так как в момент образования, частицы пыли не являются агрегированными и не связаны с поверхностью массива и, вероятность их выноса воздушным потоком с зоны образования не зависят от дисперсного состава частиц. Интенсивность пылевыделения, напротив, зависит как от интенсивности процессов диспергирования, так и от условий выноса образовавшейся пыли потоком воздуха. Процессы связанные с выносом пыли потоком воздуха теоретически описаны и экспериментально проверены [78]. В отличие от этого, процессы образования частичек пыли практически не изучены.

Рассмотрим взаимодействие двух трущихся поверхностей кусков разрушенного массива, то есть процесса который является определяющим при пылеобразовании [4]. При разрушении массива, падении кусков и т. п., происходит обязательное смещение и трение кусков разрушенного массива, вызванное силами давления режущего инструмента, гравитационными силами и силами инерции. При трении двух шероховатых поверхностей процесс образования пыли зависит, прежде всего, от степени шероховатости поверхностей, сил взаимодействия и прочностных свойств трущихся материалов. В общем случае процесс элементарного взаимодействия двух выступов шероховатости при трении поверхностей (рис. 2.1) может окончиться разрушением одного из выступов или проскальзыванием трущихся поверхностей без разрушения. Результат взаимодействия зависит при этом от множества факторов (относительной скорости, массы кусков, силы внешнего давления, формы выступов, вида материалов и т.д.) и носит вероятностный характер.

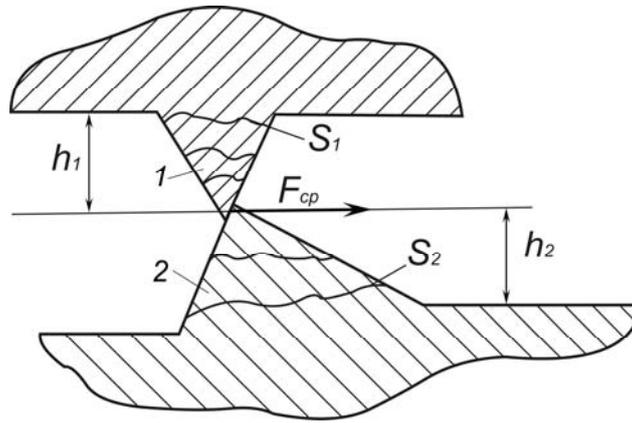


Рис. 2.1. Схема элементарного взаимодействия шероховатых поверхностей.

В общем случае разрушение выступов шероховатости осуществляется по плоскостям каких-либо нарушений в выступах 1 и 2 (границах зерен, кристаллов и т.п.) под воздействием силы среза F_{cp} . Расположения зон нарушения также носит вероятностный характер. Таким образом, в процессе взаимодействия может произойти скалывание любого из двух выступов шероховатости и образование частицы. Вероятность того, что в результате взаимодействия произойдет разрушение первого выступа шероховатости, в общем случае пропорциональна моменту силы F_{cp} равному $M_1 = F_{cp} h$ (где h - расстояние от точки взаимодействия до плоскости среза) и обратно-пропорциональна площади среза $S_{cp.1}$.

Приняв, что для выступа конусообразной формы площадь среза пропорциональна квадрату расстояния h , запишем вероятность разрушения первого выступа шероховатости и образования частицы высотой h как

$$P_1(h) = K_1' \frac{M_1}{S_1} = \frac{K_1}{h}, \quad (2.1)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий свойства материала и силы взаимодействия.

Аналогично вероятность

$$P_2(h) = \frac{K_2}{h}. \quad (2.2)$$

Вероятность того, что в результате взаимодействия размер образующихся частиц равен h

$$P(h) = P_1(h) \cdot P_2(h) = \frac{K_1 \cdot K_2}{h^2} = \frac{K_3}{h^2}. \quad (2.3)$$

Шероховатость трущихся поверхностей зависит от множества факторов и, прежде всего, от вида разрушаемого материала. Разрушение массива и обра-

зование крупных трущихся кусков происходят главным образом по имеющимся различным нарушениям в массиве, границам зерен и кристаллов, посторонним включениям и т.п. В любом случае процесс образования поверхностей носит случайный вероятностный характер, а шероховатость в таком случае подчиняется нормальному закону распределения случайных величин (рис. 2.2)

$$f_h(h) = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right), \quad (2.4)$$

где σ_h – среднеквадратическое отклонение размеров выступов 1 и впадин 2 относительно плоскости среза 3.

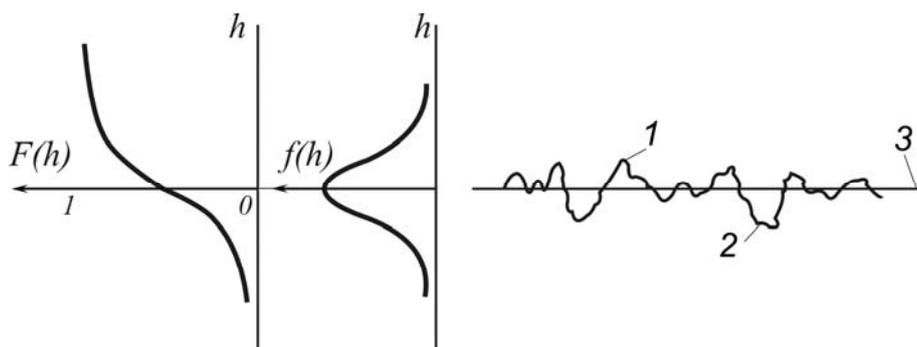


Рис. 2.2. Распределение бугорков шероховатости на трущихся поверхностях

При разрушении выступов шероховатости и образований аэрозоля величина h в общем случае является пропорциональной эквивалентному диаметру частиц δ . С учетом этого, принимая во внимание вероятность образования частиц при взаимодействии шероховатых поверхностей (2.3) распределение числа частиц пыли образовавшихся при трении

$$\varphi_h(\delta) = f_h(h) \cdot P(h) = \frac{K_3}{\sigma_h \delta^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_h^2}\right). \quad (2.5)$$

С учетом зависимости массы сферической частицы от ее размера

$$m = \frac{1}{6} \pi \delta^3 \gamma,$$

распределение массы пыли от размера

$$\varphi(\delta) = \frac{K_3 \sqrt{\pi} \delta \gamma}{6\sqrt{2} \cdot \sigma_h} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_h^2}\right). \quad (2.6)$$

Функция распределения по размерам в таком случае

$$P(\delta) = \frac{\int_0^{\delta} \varphi(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \varphi(\delta) d\delta}. \quad (2.7)$$

После интегрирования получим

$$P(\delta) = 1 - \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_h^2}\right). \quad (2.8)$$

Обозначив

$$\frac{1}{2\sigma_h^2} = b, \quad (2.9)$$

окончательно получим

$$P(\delta) = 1 - \exp(-b\delta^2), \quad (2.10)$$

$$f(\delta) = 2b\delta \exp(-b\delta^2). \quad (2.11)$$

Сопоставление полученных выражений с существующими эмпирическими и теоретическими функциями распределения показывает, что они совпадают с распределением Розина-Раммлера [66] при значении показателя степени $a = 2$. Полученное уравнение описывает прямую в двойной логарифмической координатной сетке, по оси ординат которой откладывается величина $\lg\left(\lg\frac{1}{1-P}\right)$ и проставляется значение P , а по оси абсцисс – значение $\lg\delta$, а проставляется значение δ . Функция распределения описывает в этой сетке семейство прямых

$$\lg\left(\lg\frac{1}{1-P}\right) = 2 \lg\delta + C_1, \quad (2.12)$$

с tg угла наклона равным 2 и смещением

$$C_1 = \lg(\lg e) + 2 \lg\sqrt{b}. \quad (2.13)$$

2.2. Динамика рудничных аэрозолей по длине горной выработки с учетом гравитационного и инерционного осаждения частиц пыли.

По мере движения запыленного воздуха по горным выработкам происходит снижение ее концентрации и изменение дисперсного состава пыли. Основными процессами, оказывающими влияние на концентрацию и дисперсный состав пыли, являются инерционное и гравитационное осаждение частиц, а также их диффузия [1]. Диффузионные процессы играют существенную роль только

для частиц с размерами $\delta < 1$ мкм и при анализе процессов изменения дисперсного состава рудничных аэрозолей могут не учитываться, так как доля указанной фракции в общей массе пыли даже на исходящих вентиляционных струях шахт не превышает 4%. Гравитационное осаждение частиц играет существенную роль в процессе осаждения пыли для производственных помещений и выработок с малой скоростью движения воздуха (например камер большего объема и подготовительных выработок). Характерный признак преимущественного гравитационного осаждения – интенсивное накопление пыли на горизонтальных и наклонных поверхностях и незначительное накопление на вертикальных поверхностях конвейерного става, а также кровле конвейерных выработок. Для остальных выработок наиболее характерным является инерционное осаждение пыли.

Осаждение частиц монодисперсной пыли из турбулентного потока в круглом гладком трубопроводе, при равномерном распределении концентрации частиц пыли по сечению трубопровода и чисто гравитационных процессах осаждения рассмотрено Н. Фуксом [58]. Полученное им выражение имеет вид

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{2\tau_p gL}{\pi R \bar{U}}\right), \quad (2.14)$$

где $\tau_p = \frac{1}{18} \frac{\delta^2 \gamma}{\mu}$ – время релаксации частиц; с;

δ – эквивалентный диаметр частиц пыли, мкм;

γ – плотность частиц пыли, кг/м³;

L, R – длина и радиус трубопровода, м;

\bar{U} – средняя скорость воздуха в трубопроводе, м/с;

μ – динамическая вязкость, Па·с.

g – ускорение свободного падения, м/с².

Приведенное выражение может быть использовано для анализа осаждения аэрозолей и в горных выработках при преимущественно гравитационном осаждении пыли. Учитывая то, что форма сечения выработок значительно отличается от круглого трубопровода в выражении (2.14) величину R определим как

$$R = \frac{2S}{P},$$

где S – сечение выработки, м²;

P – периметр выработки, м.

Что касается предположения о равномерной концентрации аэрозоля по сечению выработки, то, как отмечает Н. Фукс, при наличии макровихрей, сопоставимых с размерами выработок и при больших числах Re такое распределение является близким к истинному.

В общем случае принято считать, что концентрация аэрозоля в горных выработках имеет распределение по высоте [79]

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{V_s h}{K_T}\right), \quad (2.15)$$

где $V_s = \tau_p g$ - скорость осаждения частиц;

K_T – коэффициент турбулентной диффузии.

Однако выражение, по мнению Н. Фукса, является спорным, так как оно получено В. Шмидтом для условий, когда наблюдается полное вторичное сдувание аэрозоля (отсутствует осаждение) и отсутствуют макровихри в потоке (гладкие стенки трубопровода).

Воспользовавшись (2.14) с учетом приведенного начального распределения определим изменение концентрации пыли и дисперсного состава по длине выработки.

Учитывая, что выражение (2.14) справедливо только для монодисперсной пыли, а также то, что концентрацию частиц в узком диапазоне размеров $\Delta\delta$ полидисперсного аэрозоля можно представить как $\frac{dC}{d\delta} \Delta\delta$, получим

$$\frac{dC}{d\delta} = \frac{dC_0}{d\delta} \exp\left(-\frac{2\tau_p g L}{\pi \bar{U} R}\right). \quad (2.16)$$

подставив вместо τ_p его значение и введя величину

$$B = \frac{\gamma g L}{9\pi \mu R \bar{U}}. \quad (2.17)$$

Получим

$$\frac{dC}{d\delta} = \frac{dC_0}{d\delta} \exp(-B\delta^2). \quad (2.18)$$

С учетом того, что

$$\frac{1}{C_0} \frac{dC_0}{d\delta} = f_0(\delta),$$

Выражение примет вид

$$\frac{dC}{d\delta} = C_0 f_0(\delta) \exp(-B\delta^2). \quad (2.19)$$

Приняв начальное распределение из выражения (2.11), имеем

$$C = C_0 \int_0^{\infty} f_0(\delta) \exp(-B\delta^2) d\delta = C_0 \int_0^{\infty} 2b\delta \exp(-b\delta^2) \exp(-B\delta^2) d\delta. \quad (2.20)$$

Выполнив интегрирование, получим выражение для определения суммарной концентрации аэрозоля

$$C = C_0 \frac{b}{b+B}. \quad (2.21)$$

Плотность распределения пыли по дисперсному составу определим как

$$f(\delta) = \frac{dC}{Cd\delta} = \frac{b+B}{b} f_0(\delta) \exp(-B\delta^2). \quad (2.22)$$

Окончательно плотность и функция распределения

$$\begin{aligned} f(\delta) &= 2(b+B)\delta \exp[-(b+B)\delta^2], \\ P(\delta) &= 1 - \exp[-(b+B)\delta^2], \end{aligned} \quad (2.23)$$

где B – величина зависящая только от геометрических размеров выработки, скорости воздуха и плотности частиц.

Эта величина легко определяется для каждого конкретного случая.

Из уравнений (2.23) видно, что по мере распространения аэрозоля в горных выработках и изменения его дисперсного состава закон распределения массы частиц не изменяется. Угол наклона прямой, характеризующий распределение в двойной логарифмической сетке, остается постоянным, а изменяется только начальное смещение прямой.

$$C_1 = \lg(\lg e) + 2 \lg \sqrt{b+B}. \quad (2.24)$$

В реальных условиях горных выработок процесс осаждения под воздействием гравитационных сил может естественно отличаться от принятого (2.14). Отличия эти могут быть обусловлены неравномерным распределением концентрации пыли по сечению выработки и наличием иных механизмов осаждения, в частности инерционного. Однако, анализируя уравнения (2.14) и (2.19), можно заметить, что если процессы осаждения или распределения пыли в выработке экспоненциально связаны с временем релаксации, то закон распределения не меняется. Покажем это на примере учета распределения частиц пыли по высоте выработки, представленного уравнением (2.15), приняв, как рекомендовано в

работе [66], коэффициент турбулентной диффузии постоянным для выработок и равным

$$K_T = 0,044\nu Re^{0,75}, \quad (2.25)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;
 Re – число Рейнольдса.

Определим изменение средней концентрации пыли и ее дисперсного состава в горной выработке с учетом того, что осаждение пыли определяется концентрацией пыли C_0 у почвы выработки. Из (2.15) концентрация аэрозоля в месте измерения

$$C_0 = C_{п0} \exp\left(-\frac{V_s h_K}{K_T}\right), \quad (2.26)$$

где h_K – высота точки, в которой осуществляется контроль запыленности у почвы;

$C_{п0}$ – концентрация аэрозоля у почвы выработки.

Подставив в уравнение значение, выраженное через время релаксации

$$V_s = \tau_p g = \frac{1}{18} \frac{\delta^2 \gamma}{\mu} g,$$

и обозначив

$$A = \frac{1}{18} \frac{\gamma g h_K}{\mu K_T}, \quad (2.27)$$

получим

$$C_0 = C_{п0} \exp(-A\delta^2). \quad (2.28)$$

Если вместо величины C подставить полученное значение в (2.18) и провести последующие вычисления, то окончательно получим

$$f(\delta) = 2(b + B + A) \exp[-(b + B + A)\delta^2],$$

$$P(\delta) = 1 - \exp[-(b + B + A)\delta^2], \quad (2.29)$$

$$C = C_{п0} \frac{b}{b + B + A}.$$

В итоге полученный результат свидетельствует о сохранении прежнего закона распределения. Коэффициент A свидетельствует о том, что при наличии

градиента концентрации по высоте горной выработки, пыль в месте измерения является более мелкодисперсной, чем пыль у почвы горной выработки, распределение которой (при $h_n = 0$) описывается выражением (2.23). Концентрация пыли в точке измерения через концентрацию пыли у почвы, с учетом выражения (2.21) может быть определена как

$$C = C_{\text{п}} \frac{b + B}{b + B + A}. \quad (2.30)$$

Существуют следующие механизмы осаждения аэрозольных частиц: гравитационный, электростатический, инерционный и турбулентный [80]. В конвейерных выработках существенную роль играет инерционное осаждение пыли, особенно при большой скорости вентиляционных потоков. Такое осаждение происходит за счет локальных вихрей образующихся при обтекании элементов конвейера, крепи, различных препятствий, выступов шероховатости и т.п., а также осаждение под воздействием поперечной составляющей пульсационной скорости.

В шероховатом канале с рассредоточенными по его длине бугорками и неровностями, осаждение частиц происходит намного интенсивней чем в гладком. Например, в конце канала длиной 3,6 м остаточная концентрация частиц в нем оказывается в 25 раз ниже, чем в гладком канале [80]. Если шероховатость очень велика, что имеет место в горных выработках, то вязкий подслои исчезает и скорость осаждения аэрозольных частиц начинают определять вместо турбулентной миграции вихревые эффекты, и движущей силой процесса осаждения аэрозольных частиц из турбулентного потока, в этом случае, является турбулентная диффузия.

Аэродинамические явления в местных сопротивлениях оказывают сильное влияние на процесс осаждения аэрозольных частиц из турбулентного потока на стенки горной выработки. Наличие изогнутости горных выработок (повороты, извилистость) приводит к переходу механизма осаждения аэрозольных частиц от турбулентного к инерционному [80].

Одним из важных свойств пыли, как аэрозоля, является способность ее к взаимодействию с поверхностью [81]. В связи с проявлением этого свойства пыли, при движении пылевого аэрозоля по горной выработке, в которой размещены конструктивные элементы конвейера (роликоопоры, ролики и др.) представляющих собой лобовые аэродинамические сопротивления, на поверхности этих элементов конструкции конвейера осаждаются взвешенные пылевые частицы. При этом динамика реальной аэродисперсной системы осложнена различными процессами взаимодействия частиц с окружающей средой [45]. Осаждение состоит из двух стадий [83]: подхода частиц к поверхности и удержания их на поверхности элементов конвейера. Первая стадия соответствует гидродинамике, вторая – в основном адгезионному взаимодействию с поверхностью и со слоем осевших частиц. Среди причин, вызывающих столкновения и осаждение частиц на препятствиях, могут быть их инерция, касание (зацепле-

ние) и диффузия. Эффект каждой из этих трех причин различен и зависит от гидродинамики обтекания.

Поток с развитой турбулентностью в горных выработках, где вязкость пренебрежимо мала, а число Рейнольдса $Re > 10^3$, соответствует модели потенциального течения [83], при котором линии тока прижимаются к поверхности элементов конвейера значительно больше, чем при вязком. Это обстоятельство и увеличивает вероятность инерционного столкновения частиц с препятствием по сравнению с условиями при малых числах Re .

При потенциальном обтекании, линии тока прижимаются к поверхности тела значительно больше, чем при вязком (рис. 2.3) [83]. При вязком обтекании (рис. 2.3 а) траектории частиц начинают смещаться в сторону от препятствия на большие расстояния от него, чем при потенциальном (рис. 2.3 б). Очевидно, это и уменьшает вероятность инерционного столкновения частиц с препятствием по сравнению с условиями при больших числах Re .

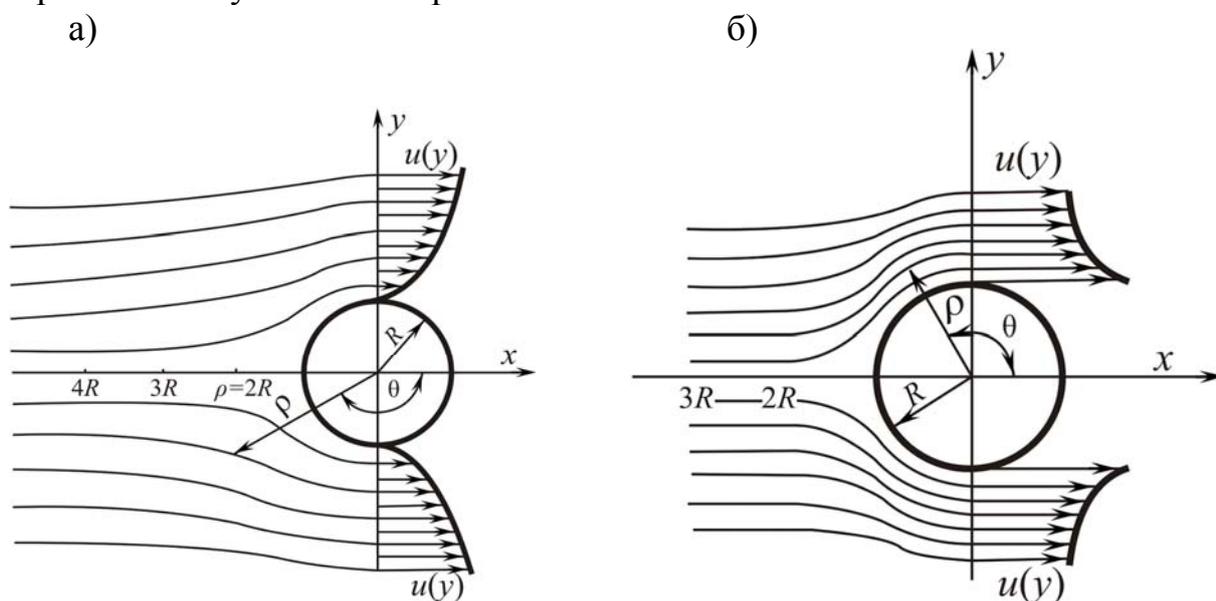


Рис. 2.3. Линии тока и эпюра скорости обтекания тела-препятствия: а – при малых числах Рейнольдса ($Re < 10^3$); б – при числах $Re > 10^3$

Траектория взвешенной в потоке частицы при обтекании потоком тела-препятствия зависит от ее момента инерции и сопротивления потока. Передвигаясь поперек изогнутых линий тока газа, частица сталкивается с поверхностью и осаждается на ней. Такое осаждение называется инерционным [80, 83].

Коэффициент осаждения за счет инерционных сил (коэффициент инерционного захвата) может быть определен как отношение расстояния от центра шара или цилиндра до предельной траектории частицы в невозмущенном потоке, которая еще может быть захвачена потоком, к радиусу шара или цилиндра (рис. 2.4), т.е. зависит от режима течения и инерционности частицы:

$$\eta_{Sik} = \frac{y_0}{R},$$

где R – радиус тела-препятствия;
 y_0 – координата предельной траектории частицы.

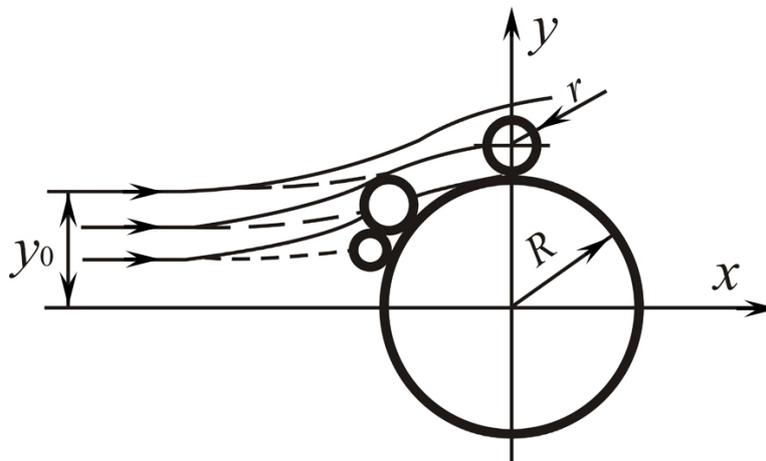


Рис. 2.4. Схема инерционного осаждения частиц при обтекании элементов конструкции конвейера.

Основной характеристикой, определяющей отношение инерционной силы, действующей на частицу, к гидравлической силе сопротивления среды, является безразмерный критерий инерционного осаждения, или число Стокса – Stk . Число Стокса, при котором инерция частицы оказывается достаточной, чтобы преодолеть увлечение ее газовым потоком, сойти с линии тока и столкнуться с препятствием называется критическим – $Stk_{кр}$, т.е. частица точно следует по линии тока и, следовательно, не может осадиться на препятствии. Захват частицы телом-препятствием возможен только при условии $Stk \gg Stk_{кр}$ [83].

Интенсивность инерционного осаждения зависит от множества влияющих факторов и до сих пор в достаточной мере не изучена, более того нет единого мнения и в характере затухания пульсационной скорости у стенок выработок. Н. Фукс [58] считает, что на интенсивность осаждения на стенки выработок и на препятствия существенно влияет также электрoзаряженность частичек. Однако можно согласиться с Н. Фуксом, что и в случае инерционного осаждения интенсивность осаждения пропорциональна концентрации частиц и их подвижности, определяемой временем релаксации. Формула описывающая процесс осаждения монодисперсного аэрозоля на участке сосуда с объемом $V_в$ и площадью поверхности $S_в$ имеет вид [58]

$$V_в \frac{dn}{dt} = S_в K_T n \tau_p. \quad (2.31)$$

Откуда концентрация частиц монодисперсного аэрозоля

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{S_в K_T}{V_в} \tau_p t\right). \quad (2.32)$$

Сопоставление выражения (2.17) с выражением для гравитационного осаждения показывает их однозначную зависимость от величины τ_p , поэтому и ход дальнейшего решения аналогичен. Учитывая, что величина $t = \frac{L}{U}$, а $\frac{S_e}{V_e} = \frac{P}{S} = \frac{2}{R}$ введем новый коэффициент B_1 , характеризующий совместное воздействие инерционных и гравитационных сил

$$B_1 = \frac{\gamma g L}{9\pi\mu R U} + \frac{K_T L \gamma}{9\mu R U} = \frac{\gamma L}{9\pi\mu R U} (g + K_T \pi). \quad (2.33)$$

Окончательно с учетом гравитационного и инерционного осаждения

$$\begin{aligned} f(\delta) &= 2(b + B_1)\delta \exp[-(b + B_1)\delta^2], \\ P(\delta) &= 1 - \exp[-(b + B_1)\delta^2], \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$C = C_0 \frac{b}{b + B_1}, \quad (2.35)$$

или в развернутом виде, с учетом введенных обозначений

$$C = C_0 \left[\frac{4,5\pi\mu R U}{4,5\pi\mu R U + \sigma_h^2 \gamma L (g + K_T \pi)} \right]. \quad (2.36)$$

После несложных преобразований и ввода обозначения

$$B_2 = \frac{\sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi)}{4,5\pi\mu R}, \quad (2.37)$$

получим

$$C = C_0 \frac{1}{1 + \frac{B_2 L}{U}}, \quad (2.38)$$

или

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{B_2 L}{U}}, \quad (2.39)$$

Величина

$$\frac{1}{1 + \frac{B_2 L}{U}} \quad (2.40)$$

характеризует осаждение пыли по длине выработки.

При анализе процессов образования и распространения пыли в горных выработках учтены основные факторы, влияющие на процесс образования и распространения пыли. Однако существует много других второстепенных факторов, которые в какой-то мере способны повлиять на распределение. В частности, при многократном взаимодействии трущихся поверхностей в процессе образования пыли, закон распределения шероховатости, будет в какой-то мере отличаться от первоначального распределения. При этом возрастает вероятность образования более грубых фракций и, как следствие, некоторого снижения показателя степени в уравнении распределения (2.11).

В случае малой инерционности частицы, когда она строго следует линиям тока газа, может произойти ее осаждение не только при пересечении ее траектории с поверхностью элементов конструкции конвейера, но и просто за счет касания поверхности этих элементов частицей при ее прохождении по линии тока газа на расстоянии от поверхности, равном ее радиусу (рис. 2.5) [83].

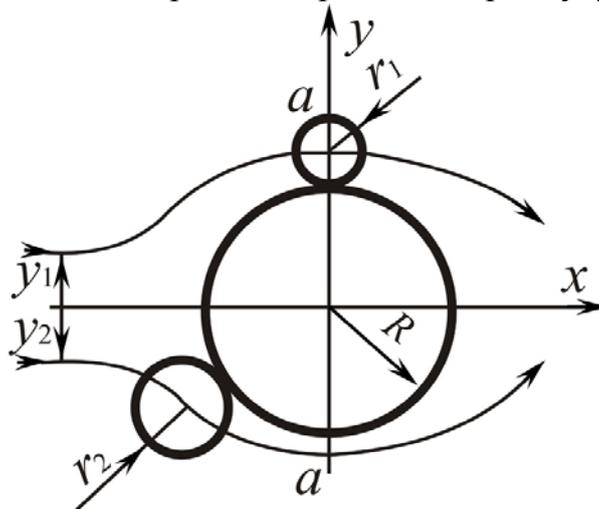


Рис. 2.5. Схема захвата частиц препятствием при касании.

Этот эффект называется касанием или зацеплением. Он зависит от параметра $R_K = r/R$.

При потенциальном течении эффект от зацепления при обтекании цилиндра лежит между R_K и $2R_K$, а при обтекании шара — между $2R_K$ и $3R_K$.

Для больших значений параметра касания R_K , эффект касания становится значительным. Он не зависит явно от скорости, но вид зависимости коэффициента захвата меняется для различных чисел Re .

Из опыта известно [84], что эффект захвата касанием является определяющим в процессах фильтрации аэрозолей (особенно на ультратонких волокнах).

Частицы субмикронного размера за счет неуравновешенных ударов молекул газа совершают скачки и отклоняются от линий тока газа. Чем мельче частицы и меньше скорость газа, тем резче должен быть выражен этот эффект.

Впервые оценка величины эффекта осаждения субмикронных частиц, если они мигрируют за счет диффузии была проведена Ленгмюром. Он рассмотрел задачу обтекания цилиндра радиусом R и выполнил расчет для диффузионного осаждения из условного слоя толщиной δ при прохождении частицы по линии тока газа в пределах угла θ от $\pi/6$ до $5\pi/6$ (рис. 2.6).

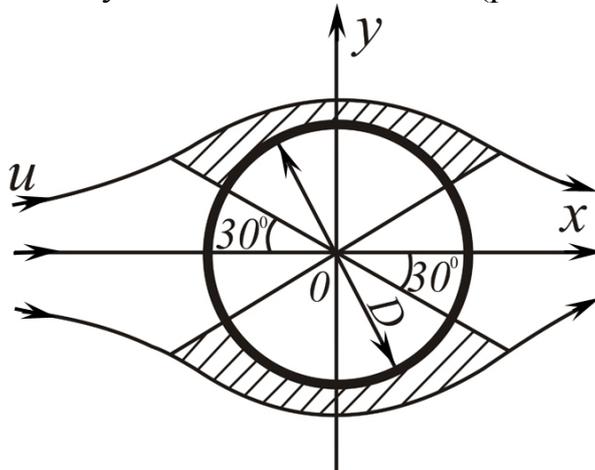


Рис. 2.6. Зона диффузионного осаждения частиц на обтекаемом препятствии

Эффект диффузионного осаждения обратно пропорционален размеру частиц, скорости потока u и размеру тела-препятствия. Он мал по сравнению с инерционным и заметен лишь для субмикронных частиц.

Рассмотренные явления (осаждения частиц аэрозоля вследствие касания и диффузионного осаждения) имеют место в выработке с конвейером, однако анализ процессов осаждения выполнен без их учета, а также без учета процессов коагуляции, заряженности частиц аэрозоля, осаждения аэрозоля на стенки выработки за счет молекулярной диффузии и возможного вторичного сдувания осевших частичек пыли. Все эти процессы носят вероятностный характер и зависят от большого количества трудноопределяемых факторов. Однако они для выработок оборудованных конвейерным транспортом не являются определяющими и не могут существенно повлиять на распределение пыли.

Учитывая изложенное, следует считать, что распределение рудничной пыли для выработки с конвейером описывается распределением Розина-Раммлера при среднем значении показателя степени $a=2$. Отклонения от этого значения объясняются наличием механизмов осаждения пыли не связанных экспоненциально с временем релаксации ее частиц.

Для проверки справедливости сделанных выводов, сопоставим полученный результат с многочисленными экспериментальными данными по определению дисперсного состава пыли изложенных в работах ученых ВостНИИ [65], МакНИИ [85, 86], Кудряшова [87], Голузина [88, 89], Бройера [90] и Никитина [91]. На рис. 2.7. представлены наиболее характерные кривые распределения, построенные в двойной логарифмической координатной сетке, и теоретическая кривая распределения с угловым коэффициентом, равным 2, при $b = 0,005$.

Для всех приведенных кривых распределения характерно то, что они в основном имеют вид прямых линий в двойной логарифмической координатной сетке, в том числе и распределения по данным ВостНИИ, которые авторы, пытаясь связать их с логарифмическим нормальным законом, изображали в логарифмически вероятностной координатной сетке кривыми линиями. Некоторое исключение представляют отдельные распределения по данным МакНИИ [86] которые в области частиц с $\delta < 20$ мкм, представляют собой прямую линию, а при больших размерах наклон прямой уменьшается. Авторы работы [86] делают неверный вывод о причине такого характера распределения, объясняя его "усечением" кривой распределения за счет выпадения грубых частиц аэрозоля. Однако при усечении кривой распределения [66] в этой области наблюдается рост крутизны кривой распределения, а указанный характер поведения кривой, по нашему мнению, объясняется, прежде всего, методическими ошибками при отборе и анализе проб пыли.

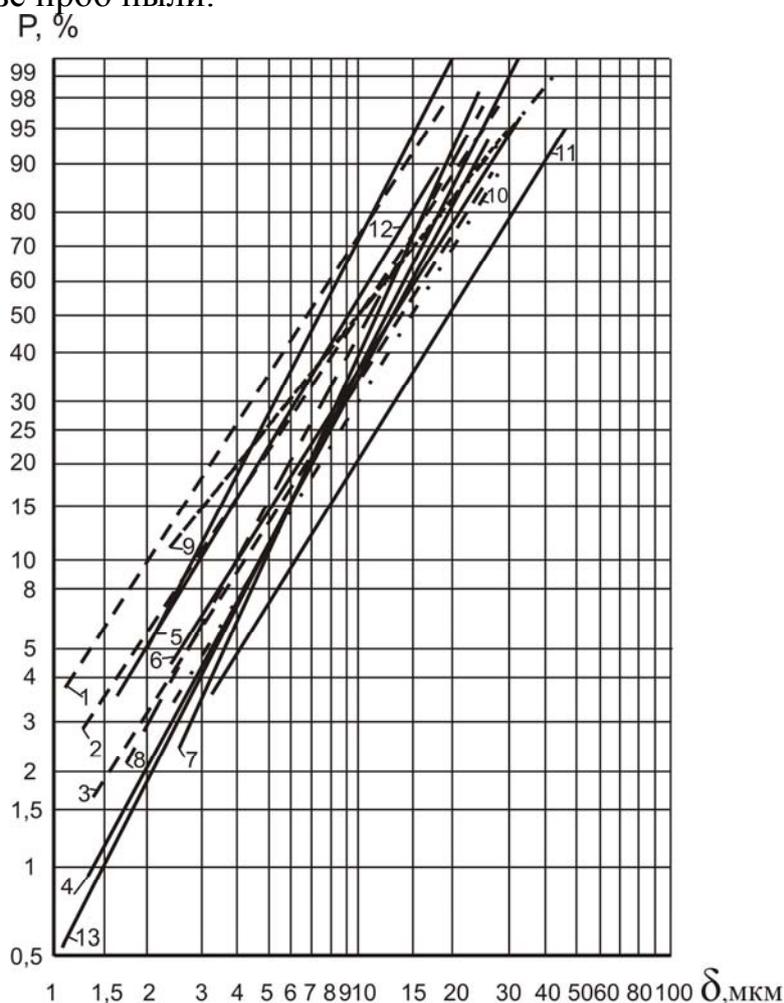


Рис. 2.7. Распределение массы пыли по диаметрам: 1 - на исходящей струе [65]; 2 - в 20 - 30 м от комбайна [65]; 3 - в зоне дыхания машиниста [65]; 4 - наиболее вероятное распределение, по данным МакНИИ [85]; 5 - вентиляционный штрек в 300м от лавы [85]; 6- перегрузочный пункт [85]; 7 - крутое падение, лава [85]; 8 - по данным Кудряшова; 9, 10 - по данным Голузина [89]; 11 - по данным Никитина [91]; 12- по данным Бройера [90]; 13 - теоретическое распределение при $a=2$ и $v=0,005$.

Тангенс угла наклона прямых находится в основном в диапазоне от 1,7 до 2,2, причем характерно то, что вблизи источников пылеобразования, как правило, угол наклона меньше, а по мере удаления от источников угол наклона распределения увеличивается. С одной стороны это может быть объяснено тем, что процесс образования пыли в какой-то мере отличается от принятой нами модели. Как указывалось ранее, это может привести к уменьшению значения коэффициента a . С другой стороны, не исключены и возможные ошибки при отборе проб у источников пылеобразования, связанные с несоблюдением условий изокINETичности отбора в турбулентных потоках и ошибки при обработке пробы.

Тангенс угла наклона кривой, характеризующей наиболее вероятное распределение по данным МакНИИ, незначительно отличается от теоретического и составляет 1,9. По-видимому, при разработке методов расчета уровня запыленности рудничной атмосферы, целесообразно в дальнейшем принять эту величину. Ошибка в определении общей концентрации пыли, а также содержание различных фракций пыли при возможных изменениях величины $1,7 \leq a \leq 2,2$ не превысит $\pm 10\%$.

2.3. Математическая модель образования, распространения и отложения пыли по длине горных выработок оборудованных конвейером.

Выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особенно опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли. Об этом свидетельствует самая крупная авария в Донбассе по катастрофическим последствиям, которая произошла на шахте им. Баракова (г. Краснодон) [15].

Исходя из “Рапорта исследования причин и последствий аварии” следует: “взрыв пылевоздушной смеси произошёл в 31-м западном штреке на сопряжении с магистральным штреком и распространился навстречу свежей струе вдоль этого штрека (длина 650 м), воздухоподающему ходу (700 м), по полю 27-й лавы (250 м) и центральному вентиляционному ходу (1300 м) вплоть до загрузочного бункера скипового ствола.

На пути распространения взрыва сработало шесть сланцевых заслонов, в том числе два в 31-м западном штреке и четыре в центральном вентиляционном ходу. Тем не менее пламя взрыва распространялось по сети выработок так, как будто этих заслонов не было. Хотя при отсутствии загазирования выработок и слоевых скоплений метана (в выработках аварийного участка были взрывоопасные отложения угольной пыли, но метан не обнаружен) достаточно сработать заслону, ближайшему к центру взрыва, чтобы его локализовать, т. е. погасить пламя.

Единственным объяснением такого характера развития аварии является то, что взрывное горение распространялось в изолированном от выработки пространстве. На шахте уголь по наклонным и горизонтальным выработкам транспортируется ленточными конвейерами 1Л-100К, причём в 31-м штреке линия состояла из четырёх последовательных конвейеров. Учитывая это, а также то, что пыль пласта с выходом летучих веществ 29,9% является весьма взрывчатой, можно предположить, что взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно рас-

пространялся по стационарной конвейерной линии, подконвейерное пространство в данном случае выполняло функцию проводника. Этот вывод подтверждается и состоянием аварийных выработок после взрыва: по всей длине 31-го штрека ленточные конвейера разрушены, роlikоопоры сбиты и частично разбросаны по выработке; по всей длине центрального ходка роlikоопоры сбиты с канатов, пожарно-оросительный и воздушный трубопроводы разорваны в трёх местах, а в пяти образовались вывалы объёмом 1,5-4 м³, разрушена телефонная связь и сигнализация конвейеров; элементы всех сработанных заслонов располагались практически в месте их установки – длина запылённого участка выработки не превышала 40 м.

Таким образом, система взрывозащиты конвейерных выработок требует принципиального совершенствования. Существующие устройства, как видно, не позволяют полностью локализовать последствия взрыва.

Известно также, что в горные выработки угольной шахты поступает 40% метана за счет газовыделений из отбитого угля транспортируемого от очистного забоя до поверхности. В связи с этим, в реальных условиях в рудничной атмосфере горных выработок угольных шахт, как правило, образуются тройные смеси (угольная пыль + метан + воздух) с тем или иным соотношением горючих компонентов.

Главной особенностью тройных смесей является то, что взятые в отдельности невзрывчатые концентрации метана и угольной пыли в смеси с воздухом приобретают взрывчатые свойства. Присутствие метана даже в небольших количествах заметно снижает нижний предел взрываемости угольной пыли [10].

Один из основных факторов, обуславливающих пылевзрывоопасность горных выработок, является пылеотложение. Особенно интенсивное пылеотложение наблюдается в конвейерных выработках [27]. Это связано с тем, что конвейерные выработки, в связи с загромождением их конвейером, имеют большую площадь соприкосновения с пылью при ее распространении с воздушным потоком по длине выработки, а, следовательно, и процессы адгезии в конвейерной выработке происходят более интенсивно. Кроме того, отложение угольной пыли по длине конвейерной линии происходит по всей поверхности выработки за счет осаждения пыли из проходящего воздуха, под роliками холостой ветви, на роlikоопорах, на предохранительных полках, а также на почве выработки за счет просыпания транспортируемого угля.

Полное пылеотложение в конвейерных выработках, оборудованных скребковыми конвейерами, достигает 1500, ленточными – 8000 г/(м³·сут) и более [24].

Потери угля по длине конвейерных выработок зависят от состояния конвейерных линий, нарушений режима эксплуатации конвейерных установок, качества стыковки секций скребковых конвейеров и достигают в отдельных случаях 3% от общего количества транспортируемого угля.

Таким образом, основными процессами пылеобразования в конвейерных выработках являются:

- сдувание пыли с грузовой ветви конвейерной ленты;

- накапливание просыпей в подконвейерном пространстве, содержащих до 40% пыли с последующим сдуванием ее;
- пылеобразование на перегрузе с конвейера на конвейер.

Изменение концентрации пыли по длине конвейерной выработки с учетом работы конвейера как линейного источника пылеобразования

Модель изменения концентрации пыли по длине выработки (2.36) учитывает точечный источник пылеобразования. Однако в конвейерной выработке источники пылеобразования распределены по длине. Поэтому при наличии конвейеров, модель требует уточнения.

Рассмотрим изменение концентрации пыли по направлению движения воздуха в конвейерной выработке длиной L (рис. 2.8).

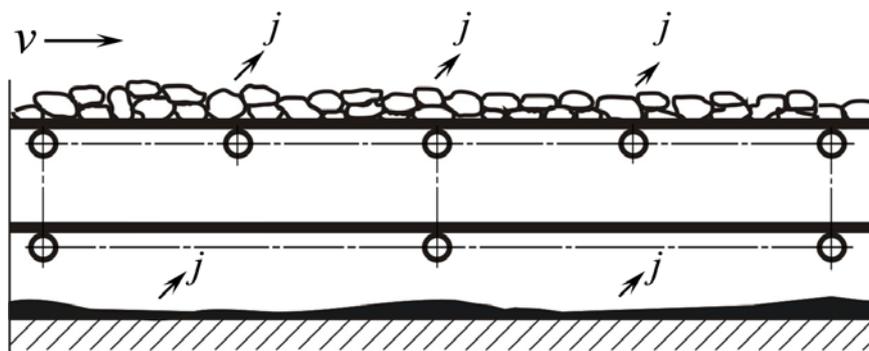


Рис. 2.8. Схема определения концентрации витающей пыли

Пылеобразование при работе конвейера представим как процесс поступления пыли от источника, равномерно распределенного по всей длине выработки. Интенсивность пылеобразования с единицы длины конвейера выразим через плотность потока частиц пыли, приходящихся на долю конвейера j , мг/с·м.

Таким образом, для стационарного процесса образования частиц пыли с интенсивностью j в стабилизированной зоне конвейерной выработки сечением S_k , изменение концентрации пыли $C(L)$ по длине конвейера L в вентиляционном потоке движущегося со средней скоростью v_{cp} , может быть записано в виде:

$$C(L) = \frac{jL}{S_k v_{cp}}, \quad (2.41)$$

Пыль, образовавшаяся в результате работы конвейера (распределенный по длине источник пылеобразования), а также ведения технологических работ по отбойке угля от массива горных пород (точечный источник), оседает по длине конвейерной выработки под действием гравитационных, инерционных, электростатических и других сил, в результате чего ее концентрация в вентиляционном потоке изменяется. Кроме того, динамика реальной аэродисперсной системы осложнена различными процессами взаимодействия частиц с окружающей средой. Для взвешенных частиц, движущихся в горной выработке, ин-

тенсивность оседания определяется концентрацией пыли в воздухе и скоростью воздушного потока.

С учетом оседания пыли (2.40), образовавшейся в результате работы конвейера и (2.41)

$$C_{\kappa}(L) = \frac{jL}{S_{\kappa}(v_{cp} + B_2L)} . \quad (2.42)$$

Общий вид зависимости концентрации угольной пыли от координаты длины горной выработки с учетом модели концентрации пыли образовавшейся в результате выполнения технологических работ (2.36), описывающей процесс изменения концентрации угольной пыли по длине выработки с учетом гравитационного и инерционного осаждения, в окончательной форме будет иметь следующий вид:

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{B_2L}{v_{cp}}} + \frac{jL}{S_{\kappa}(v_{cp} + B_2L)} \quad (2.43)$$

или

$$C = \left(C_0 + \frac{jL}{S_{\kappa}v_{cp}} \right) \frac{1}{1 + \frac{B_2L}{v_{cp}}} . \quad (2.44)$$

С учетом (2.37)

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{\sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi) L}{4,5 \cdot \pi \mu R \bar{U}}} + \frac{jL}{S_{\kappa} \bar{U} + \frac{S_{\kappa} \sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi) L}{4,5 \cdot \pi \mu R}} \quad (2.45)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (2.43) характеризует процесс пылеобразования при работе конвейера. При достаточно большой длине конвейерных выработок ($L \rightarrow \infty$) концентрация пыли в них определяется в основном процессом пылеобразования от работающего конвейера. Так как источник распределен по длине, то удельное пылеобразование от конвейера выражается величиной

$$C_{\kappa} = \frac{j}{S_{\kappa}(v_{cp} + B_2)} . \quad (2.46)$$

Графическая интерпретация модели (2.45) представлена на рис.2.9.

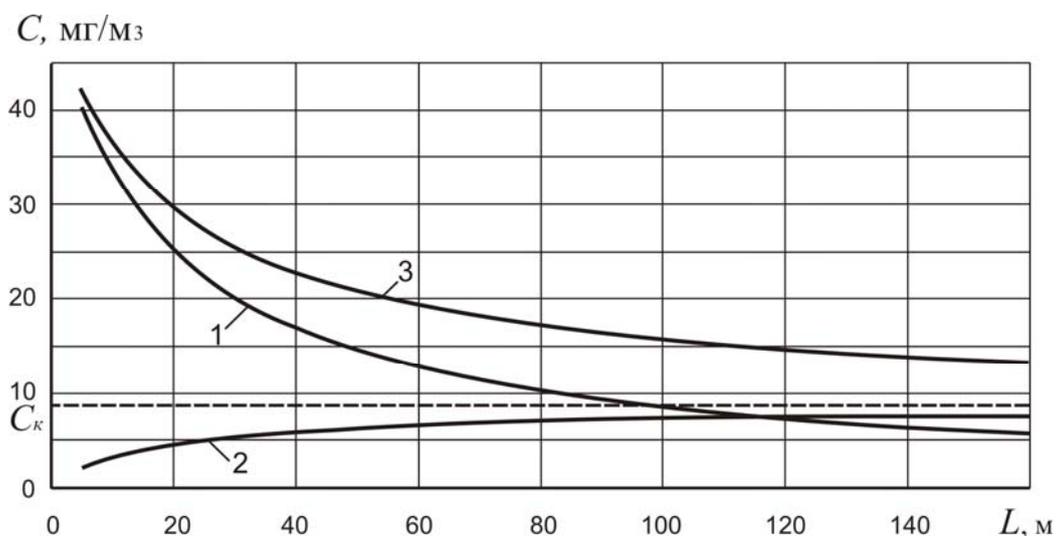


Рис. 2.9. График изменения содержания пыли по длине конвейерного штрека: 1 – кривая, характеризующая снижение содержания пыли, поступающей в выработку; 2 – поступление пыли в выработку от конвейера; 3 – результирующая экспонента.

Из рисунка видно, что при наличии постоянно действующего распределенного источника пыли в выработке в виде конвейера, математическая модель изменения концентрации пыли по длине выработки представляет собой кривую близкой к экспоненте с асимптотой C_k . Параметры модели (2.46) определяются пылевыделением конвейера, параметрами пыли, выработки и скоростью вентиляционного потока.

Отложение пыли в конвейерных выработках

Общее количество пыли осажденное в конвейерной выработке складывается из количества пыли осажденной из движущегося потока воздуха на стенки выработки и на элементы конвейера, а также количества пыли осажденной в подконвейерном пространстве в результате работы конвейера.

Пылеотложение на участке между начальным и i -м сечениями горной выработки определяется по формуле [23]

$$P = Sv(C_0 - C_i)t, \quad (2.47)$$

где C_i – концентрация пыли в потоке в i -м сечении горной выработки, мг/м³;
 v – скорость воздуха в горной выработке, м/с;
 t – время, с.

С учетом (2.36), (2.42), (2.47) и того, что для пылеотложения существует функция $P = f(L)$, отражающая его зависимость от удаленности исследуемого сечения, интенсивность пылеотложения по длине горной выработки за 1с можно описать следующим выражением

$$P = SvC_0 - \frac{SvC_0}{1 + \frac{B_2L}{v}}. \quad (2.48)$$

В (2.48) не учтено влияние работы конвейера, как рассредоточенного по длине выработки источника пылеобразования.

Более полно интенсивность пылеотложения по длине конвейерной выработки отражает зависимость вида

$$P_{\kappa} = SvC_0 \left(1 - \frac{1}{1 + B_2L/v} \right) + P_{o.\kappa}, \quad (2.49)$$

где $P_{o.\kappa}$ – интенсивность отложений пыли образованной конвейером.

В горной выработке, вмещающей линейный источник пылеобразования, масса пыли, осевшей на бесконечно малом отрезке участка конвейерной выработки, определяется зависимостью [26]

$$P_L = -\frac{dC}{dL} Q_v, \quad (2.50)$$

где P_L – масса пыли, осевшей на бесконечно малом участке конвейерной выработки, г/м;

dC – концентрации пыли на границах бесконечно малого участка конвейерной выработки, г/м³;

dL – длина участка конвейерной выработки, м.

Q_v – количество проходящего воздуха, м³/с.

Количество пыли, которое осаждается в определенный период времени в объеме конвейерной выработки связано с количеством пыли, которая осела на поверхности этой выработки соотношением [26]

$$P = \frac{P_V}{t} = \frac{P_L}{tS_B} = \frac{P_S P_B}{tS_B}, \quad (2.51)$$

где t – время пылеотложения, с;

S_B – поперечное сечение выработки, м²;

P_B – периметр выработки, м.

P – масса пыли осевшей в единице объема выработки, г/(м³·с)

P_S – масса пыли осевшей на единице поверхности выработки, г/м²

С учетом (2.51), где интенсивность пылеотложения P выражена через количество пыли, осевшей на единице длины горной выработки P_L , процесс вторичного пылеотложения можно описать выражением

$$P_{o.\kappa} = \frac{P_{o.\kappa,L}}{S_B t}. \quad (2.52)$$

где $P_{o.k.L}$ – отложение пыли образованной конвейером, осевшей на бесконечно малом участке горной выработки, г/м;

Процесс перехода пыли, образованной в результате работы конвейера, во взвешенное состояние можно сравнить с процессом взметывания вторичной пыли [92, 26, 11]. Пыль образованная конвейером, осаждается. Таким образом, имеет место процесс массопереноса, который описывается общим уравнением следующего вида [93, 94, 82]

$$\frac{dC}{dt} + D \frac{d^2C}{dL^2} + \bar{U} \frac{dC}{dL} + \Delta C = f(t). \quad (2.53)$$

Так как процесс стационарный во времени, принимаем $dC/dt = 0$. В связи с установившимся режимом, пылеобразование от конвейера в каждом сечении постоянно и не зависит от расстояния, на котором находится это сечение от начала выработки. При этом пыль, образовавшаяся в результате работы конвейера на участке между рассматриваемым сечением и началом выработки зависит от длины этого участка. Следовательно, распределенный источник пылеобразования от конвейера определяется не временным, а линейным показателем. Значит $f(t)=f(L)$.

Применительно к горным выработкам, где однонаправленный конвективный перенос пыли с потоком значительно превышает диффузию [37], вторым членом левой части уравнения (2.53) можно пренебречь.

Коэффициент Δ является параметром экспоненты [37]. Он определяет скорость оседания пыли также как и коэффициент снижения концентрации пыли, зависящий от расстояния до источника b_1 , который имеет такое же происхождение и может выражаться в следующих видах [38, 95, 96]

$$b_1 = D \frac{u_B}{hu_{cp}} = m_0^4 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} = \frac{\beta}{Q}$$

или [78]

$$b_1 = \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{l_2 - l_1}, \quad (2.54)$$

где D – коэффициент турбулентной диффузии;

h – средняя высота выработки, м.

S – сечение выработки, м²;

Q – количество воздуха, проходящее по выработке м³/с;

β – коэффициент, характеризующий выпадение пылевых частиц из потока, м²/с;

C_1, C_2, l_1, l_2 – граничные концентрации и координаты зоны активного осаждения пыли по длине выработки.

Параметр Δ определяется из выражения [97]

$$\Delta = U_{cp} \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{l_2 - l_1} \quad (2.55)$$

На основании сопоставления (2.54) и (2.55), в работе [92] получена формула для замещения параметра Δ

$$\Delta = U_{cp} b_1. \quad (2.56)$$

Подставив в (2.53) функцию источника, заменив параметр Δ в соответствии с (2.56), при этом не учитывая турбулентную диффузию, уравнение массопереноса пыли образованной в результате работы конвейера имеет следующий вид

$$\frac{dC}{dL} + b_1 C = \frac{f(L)}{U_{cp}}. \quad (2.57)$$

Дифференциальное уравнение (2.56) имеет общее решение [98, 67, 93, 94]

$$C(L) = -C_{\kappa 0} \exp(-b_1 L), \quad (2.58)$$

где $C_{\kappa 0}$ – функция, которая определяется конвейером как распределенным источником пыли, на участке от сопряжения выработки с очистным забоем до сечения в месте замеров и характеризуется интегральной суммой концентраций пыли, образованной конвейером на этом интервале.

Функция $C_{\kappa 0}$ определяется по вариативному методу произвольной постоянной [98, 94]

$$C_{\kappa 0} = -\frac{f(L)}{U_{cp}}. \quad (2.59)$$

Если на элементарном участке выработки dL в какой то период времени выделилось количество пыли $q(L)$, при условии что эта функция постоянна и не зависит от расстояния, то количество пыли которое выделилось от начала до анализируемого сечения выработки определяется как

$$C_{\kappa \Sigma \max}(L) = q(L)L. \quad (2.60)$$

Чем меньше площадь поверхности образования пыли, тем меньшее количество пыли взмetyвается, в связи с чем на бесконечно малом участке сечения функция $q(L)$ будет стремиться к нулю и функция источника $f(L)$ для сечения выработки, которое удалено на расстояние L , является интегралом функции (2.59). В соответствии с (2.59) функция $C_{\kappa 0}$ имеет следующий вид:

$$C_{\kappa 0} = -q(L) \frac{L}{U_{cp}}. \quad (2.61)$$

Таким образом, на основании (2.58) и (2.61), решение уравнения (2.57) [98], описывающего изменение концентрации пыли по длине горной выработки с конвейером образованной в результате его работы при транспортировке горной массы будет иметь следующий вид:

$$C_{\kappa}(L) = q(L) \frac{L}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (2.62)$$

Уравнение (2.62) позволяет установить концентрацию пыли, которая поступила в сечение за период L/U_{cp} , который является усредненным временным показателем движения воздуха по участку выработки длиной L , означающий для условий стационарного процесса, что за время образования и перехода частиц пыли во взвешенное состояние в результате работы конвейера, они пройдут путь, который равен расстоянию L , определяемый скоростью движения воздушного потока U_{cp} , и одновременно во взвешенное состояние должно перейти количество пыли равное $q(L) \frac{L}{U_{cp}}$. Выражение (2.62) принимаем как функцию за-

дающую концентрацию пыли на каком то участке dL , которая образовалась в результате работы конвейера при транспортировке горной массы. Угольная пыль, которая образовалась при работе конвейера при транспортировке горной массы, через некоторый промежуток времени, оседает и затем опять переходит во взвешенное состояние. Убывание отложившейся пыли в процессе перехода ее во взвешенное состояние на некотором бесконечно малом отрезке конвейерной выработки [99] описывается выражением

$$-P_{o.\kappa.L} = -\frac{dC_{\kappa}(L)}{dL} Q, \quad (2.63)$$

где Q – расход воздуха в выработке, m^3/c

$$Q = U_{cp} S_B. \quad (2.64)$$

В установившемся режиме составляющая $q(L)$ производной функции $C_\kappa(L)$ постоянна [98] поэтому можем записать

$$\frac{dC_\kappa(L)}{dL} = q(L) \frac{b_1 L - 1}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (2.65)$$

Для бесконечно малого отрезка конвейерной выработки, с целью определения осевшей пыли образованной конвейером при транспортировке горной массы $P_{o.\kappa.L}$ подставим (2.64) и (2.65) в (2.63) и получим

$$P_{o.\kappa.L} = K_t U_{cp} S_B \cdot q(L) \frac{b_1 L - 1}{U_{cp}} \exp(-b_1 L). \quad (2.66)$$

Для определения интенсивности отложения пыли образованной конвейером, подставим (2.66) в (2.51) и получим

$$P_{o.\kappa.}(L) = q(L)(b_1 L - 1) \exp(-b_1 L), \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (2.67)$$

С учетом того, что

$$b_1 = m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}}$$

выражение (2.67) имеет вид

$$P_{o.\kappa.} = q(L) \left(L m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(- L m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} \right), \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) \quad (2.68)$$

С учетом полученного выражения (2.68) модель интенсивности пылеотложений (2.49) примет вид

$$P_\kappa = S \nu C_0 \left(1 - \frac{1}{1 + B_2 L / \nu} \right) + q(L) \left(L m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(- L m_0 \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} \right). \quad (2.69)$$

С учетом (2.37)

$$P_\kappa = S_\kappa \nu C_0 \left(1 - \frac{4,5 \cdot \pi \mu R \nu}{4,5 \cdot \pi \mu R \nu + \sigma_h^2 \gamma (g + K_T \pi) L} \right) + q(L) \left(L m_0 \sqrt[4]{\frac{S_\kappa}{Q^3}} - 1 \right) \exp \left(- L m_0 \sqrt[4]{\frac{S_\kappa}{Q^3}} \right) \quad (2.70)$$

При работе конвейера появляется также дополнительное электростатическое осаждение частиц пыли в связи с трением ленты и, кроме того, имеет место эжектирующее действие конвейерной ленты на оседание пыли в подконвейерном пространстве.

На основании выполненных исследований установлено, что:

- дисперсный состав пыли является наиболее изменчивым и трудно предсказуемым фактором, оказывающим решающее влияние на изменение концентрации пыли в горной выработке;

- логарифмически нормальное распределение, распределение по исправленной формуле Ромашова и другие теоретические законы распределения получены для условий не соответствующих механизму образования рудничных аэрозолей и являются неприемлемыми для их описания;

- при распространении аэрозолей в горных выработках, изменения его дисперсного состава не приводят к изменению закона распределения, если процессы осаждения или распределения пыли в выработке экспоненциально связаны с временем релаксации. Угол наклона прямой, характеризующей распределение в двойной логарифмической сетке, остается постоянным, а изменяется только начальное смещение прямой.

- влияние зоны подконвейерного пространства на уровень пылевзрывобезопасности конвейерной выработки обусловлено его изолированностью от общего пространства выработки и выполнением функции проводника взрывного горения в аварийной ситуации, что снижает эффективность противопопылевых мероприятий и требует дополнительных способов и технических средств предупреждающих отложение пыли в подконвейерном пространстве.

Теоретический анализ процессов образования аэрозолей при разрушении горных пород, выполненный с учетом вероятностного характера разрушения и шероховатости трущихся поверхностей, позволил получить математическое описание функций распределения. Сопоставление полученных выражений с существующими эмпирическими функциями показывает, что они совпадают с распределением Розина-Раммлера при значении показателей степени равным двум.

Получены выражения позволяющие рассчитать концентрацию и дисперсный состав рудничных аэрозолей по длине и высоте горных выработок при наличии гравитационного и инерционного осаждения частиц.

Полученная математическая модель изменения концентрации пыли по длине выработки при наличии в ней конвейера представляет собой кривую близкой к экспоненте с асимптотой, параметры которой зависят от содержания пыли в вентиляционном потоке, пылевыведения конвейера, параметров пыли, выработки и скорости воздушной струи.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕВОЙ ДИНАМИКИ В КОНВЕЙЕРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

3.1. Методы исследований запыленности шахтного воздуха

Замеры запылённости воздуха производились в основном весовым способом с применением фильтров АФА-В-10 по общепринятой методике. Для протягивания исследуемого воздуха через фильтр применялся, как правило, воздушный эжектор. Продолжительность и место отбора проб, объём просасываемого через патрон воздуха устанавливались в зависимости от назначения отбора пробы. Запылённость воздуха n при весовом методе определяется по формуле

$$n = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{Qt}, \text{ мг/м}^3$$

где m_1 – масса чистого фильтра, мг;
 m_2 – масса запыленного фильтра, мг;
 Q – расход воздуха при просасывании л/мин;
 t – время просасывания, мин.

Необходимое количество проб N_n устанавливается исходя из величины допустимой ошибки и требуемой надежности результатов наблюдений принятой в математической статистике зависимости

$$N_n = \delta^2 \frac{w^2}{p^2}$$

где δ – нормированное отклонение (используется как коэффициент гарантии надежности, определяющей значение доверительной вероятности);
 w – коэффициент вариации, характеризующий изменчивость результатов подсчета по различным пробам;
 p – допускная величина ошибки.

При величине допускной ошибки 15%, коэффициенте вариации 20%, нормированном отклонении 1,65 (с доверительной вероятностью 90%) необходимое количество проб составит

$$N_n = 1,65^2 \frac{20^2}{15^2} = 4,84 \cong 5.$$

Измерения количества воздуха, поступающего в горную выработку выполнялись с помощью крыльчатого анемометра АСО-3 методом “в сечении”.

Небольшие расходы воздуха, при которых скорость в выработке находилась ниже чувствительности крыльчатого анемометра, определяли с помощью пневмометрической трубки и микроанометра ММН-1М, путем измерения поля скоростей в трубопроводе. Для измерения высоких скоростей воздуха использовался чашечный анемометр типа МС-13.

Для определения общего количества пыли осаждающейся в конвейерной выработке применялся метод определения пылеотложения по изменению средней концентрации пыли, витающей в воздухе. Производились длительные замеры запыленности воздуха с одновременными замерами скорости его движения. Определялась концентрация пыли в пункте, отстоящем на 1 м от натяжного барабана и в конце конвейера. По разности полученных концентраций в начальном и конечном пунктах определялось количество осаждающейся пыли по всей конвейерной выработке.

Для определения количества пыли осаждающейся в подконвейерном пространстве использовался метод сбора пыли на подложки, которые устанавливались непосредственно под холостой или грузовой ветвями конвейера и по количеству осевшей пыли за определенное время определялось пылеотложение (г/м^2) на подложку по формуле [11]

$$P_s = \frac{m}{F},$$

где F - площадь подложки, м^2 ; m - масса пыли на подложке, г.

При исследовании интенсивности пылевыделения конвейера измерения производились в два приема при отдельной стабилизации одного из параметров: количество воздуха Q , подаваемого в забой, или производительности конвейера. Концентрация пыли измерялась в зоне установившегося движения воздуха. Отбор проб производился при этом одновременно на четыре фильтра АФА, установленные соответственно в центрах четырех равных площадок, на которые условно разделялось сечение выработки.

Это позволило в значительной степени устранить влияние неоднозначности концентрации пыли по сечению выработки на результаты измерения интенсивности пылевыделения.

При определении интенсивности пылеобразования в конвейерных выработках использовали методику с применением замерных площадок. В обычных выемочных штреках это осуществлялось при действующей вентиляции, которая накладывает влияние пылеобразования в очистной выработке. Для определения интенсивности пылевыделения только от конвейера выбирались непроветриваемые участки конвейерной линии, ограниченные с двух сторон вентиляционными перемычками.

Отбор проб для определения запыленности воздуха в конвейерных выработках производился только при работающем конвейере.

Пылевой фон в конвейерных выработках при неработающем оборудовании в очистном забое составляет $0,3 \dots 0,4 \text{ мг/м}^3$.

Обработка полученных значений пылевых замеров производилась с помощью общеизвестных методов математической статистики. При этом находилась ширина интервала при группировке некоторого числа измерений, а ряд значений запыленности аппроксимировался логорифмическим нормальным законом распределения. Среднюю величину запыленности определяли как математическое ожидание ее случайной величины.

3.2. Характеристика источников запыленности воздуха в конвейерных выработках

Весьма существенным источником пылеобразования в угольных шахтах выступают транспортировка и перегрузка отбитой горной массы. Здесь также на уровень пылеобразования влияют скорость вентиляционной струи, влажность транспортируемого материала и перепад высот его падения [29].

Установлено, что запыленность воздуха в выработках угольных шахт с конвейерной доставкой угля без применения каких-либо средств борьбы с пылью, за исключением обеспыливающей вентиляции, колеблется от 25 до 100 мг/м³, что указывает на существование определенных факторов, влияющих на уровень запыленности [100, 101, 29].

Общую картину распределения концентрации пыли по сечению конвейерной выработки следует рассматривать как результат наложения пылевых потоков, обусловленных несколькими источниками пыли, основными из которых являются:

- вынос запыленного воздуха из очистного забоя от работающего добычного оборудования;
- пункт перегрузки угля в месте сопряжения конвейерного штрека с лавой;
- образование пыли по всей длине конвейерных линий за счет просыпания угля с лент и истирания угольной мелочи в зоне контакта ленты с рамками, приводными и натяжными барабанами;
- просыпи в подленточном пространстве;
- запыленность воздуха, подаваемого для проветривания выработок.

Основной причиной выноса пыли из транспортируемой горной массы на перегрузе является эжекция – формирование направленных воздушных течений в потоке горной массы за счет динамического взаимодействия падающих частиц с воздухом [102, 103].

Пылеобразование на пунктах перегрузки объясняется, главным образом, наличием в горной массе пылевидных фракций, способных находиться определенное время во взвешенном состоянии. Они образуются не только при механическом измельчении при отбойке горной массы от массива горных пород, но и в результате столкновения частиц друг с другом, а также с различными твердыми препятствиями горного оборудования.

Рассматривая механизм пылевыделений при перегрузке горной массы, можно выделить три последовательно сменяющие друг друга стадии [102]:

- аэрирование свободно падающего потока горной массы;
- динамическое взаимодействие потока ускоренно падающих частиц и воздуха в перегрузочных устройствах;
- выделение эжектируемого запыленного воздуха из потока при укладке частиц на ленту конвейера.

Характерной особенностью первой стадии является разрыв аутогезионных сил сцепления между пылевыми частицами в момент сбрасывания потока горной массы с приводного барабана верхнего конвейера. Начинает формироваться аэродисперсная система – пылевой аэрозоль.

В процессе свободного падения разрыв конгломерата частиц усиливается в результате динамического взаимодействия с воздухом и соударения с более крупными частицами, а также с конструктивными элементами перегрузочного устройства. Возникающий эжекционный поток воздуха интенсивно насыщается пылевыми частицами и в момент укладки горной массы на нижний конвейер образует настилающуюся струю запыленного воздуха. На этой стадии происходит, с одной стороны, инерционная сепарация частиц и выпадение их на поверхность уложенного материала, с другой – сдув осевших мелких частиц и вынос их этой струей в атмосферу конвейерной выработки.

Пылеобразование на пунктах перегрузки существенно зависит от высоты перепада, скорости движения материала в момент его сбрасывания и от угла сбрасывания. Изменение последнего от -45° до $+45^\circ$ приводит к возрастанию запыленности в 1,5—2,0 раза. При отрицательных углах сбрасывания, т. е. при транспортировке материала вниз по выработке, увеличение скорости ленты способствует уменьшению пылеобразования, а при транспортировании вверх, наоборот, к значительному увеличению пылеобразования и запыленности воздуха [29].

Вопрос о распределении концентрации пыли в конвейерных выработках как по сечению, так и по длине очень важен не только для пылевого контроля, отражающего действительную среднюю концентрацию пыли в выработке, но и при разработке мероприятий по борьбе с пылью. С удалением от источника пылеобразования поток расширяется и концентрация пыли по его сечению выравнивается [29, 103].

Характер концентрации пыли в поперечном направлении конвейерной выработки неодинаков. Так, вблизи грузовой ветви конвейера она более высокая и уменьшается по направлению к стенке конвейерной выработки. Увеличению поперечного распространения пыли способствует рост шероховатости границ потока, наличие лобовых сопротивлений на пути движения воздуха, т. е. факторы, усугубляющие аэродинамическое сопротивление конвейерной выработки. В зоне расположения крепи концентрация пыли выравнивается. В сечении подконвейерного пространства ее спад незначителен и ее величину приближенно можно считать постоянной.

Анализ пыли показал, что она в основном состоит из тонких фракций [19]. При испытании на взрывчатость пыль, взятая даже с почвы и содержащая наиболее высокий процент золы от попавшей в нее инертной пыли, применяемой для осланцевания выработки, легко взрывалась. Техническим анализом установлено, что содержание летучих в пыли составляет от 17 до 27%.

При транспортировании угля конвейерами под рабочей и холостой ветвями образуются просыпи угольной мелочи, содержание пыли в которой составляет более 40% [19]. Нерегулярная уборка этих просыпей приводит к постепенному заполнению ими подконвейерного пространства, что приводит к интенсивному пылеобразованию за счет увеличения трущихся поверхностей на конвейере и вымывания пылевых частиц вентиляционной струей.

Основная масса просыпей на местах перекрытия под верхней ветвью конвейера состоит из мелких частиц угля диаметром от 1 до 15 мм. При набегании

стыков на ролики происходит удар и встряхивание горной массы, часть которой просыпается в районе рамкоопоры.

Опыт эксплуатации конвейеров на угольных шахтах показывает, что основными причинами образования просыпей под грузовой ветвью являются:

- неудовлетворительная центровка ленты;
- наличие шарнирных стыков на ленте;
- порывы и проколы ленты.

Причинами образования просыпей под холостой ветвью являются:

- налипание в связи с влажностью угля;
- неудовлетворительная работа узлов перегрузки с конвейера на конвейер.

Большее количество штыба отлагается под роликами конвейера, расположенными ближе к приводу. Многократные замеры показали [19], что количество штыба, отлагающегося под роликами, расположенными в 5...10 м от приводного барабана, в среднем составляло 350...500 г/мин и под последними роликами, поддерживающими холостую ветвь ленты, 25...40 г/мин. Также было установлено, что количество угольной пыли, прилипающей к ленте, в значительной степени зависит от влажности угля. В связи с этим на шахте, где применяется искусственное увлажнение угля водой, под конвейером откладывается штыба больше, чем на шахте, транспортирующей уголь без искусственного увлажнения.

При использовании соединительных шарниров ленты, они являются одной из причин пылеобразования, так как в зазоры, имеющиеся между этими шарнирами, при переходе замка ленты через роликовые опоры, просыпается некоторое количество штыба на нижнюю ветвь, который, попадая под натяжной барабан, раздавливается в пыль и выбрасывается в воздух.

При образовании просыпей, последние скапливаются сначала вблизи поддерживающих роликов, а затем постепенно распространяются на всю площадь под холостой и грузовой ветвями конвейера. Пылеобразование в конвейерной выработке увеличивается после того, как просыпи начинают соприкасаться с вращающимися роликами и движущейся конвейерной лентой. Чем больше площадь такого контакта, тем больше пылеобразование. Следует заметить, что на мощных конвейерных установках наклонных стволов пылеобразование значительно выше, так как скорость ленты гораздо выше, чем на конвейерных выемочных штреках.

Ручная уборка просыпей очень трудоемка и непроизводительна. Это связано со стесненными габаритами ленточного конвейера по высоте. Кроме того, при ручной уборке увеличивается пылеобразование по выработке.

3.3. Интенсивность накопления частиц угля в подконвейерном пространстве

Для разработки способов и средств уборки просыпей необходимо определить интенсивность их отложения. С этой целью были выбраны участки конвейерных линий, расположенных на выемочных штреках. Были намечены замерные площадки через равные расстояния по длине конвейерного става. Количество не менее 5 как под холостой, так и грузовой ветвями.

На выемочных штреках угольных шахт применяются ленточные конвейеры с листами перекрытия под грузовой частью конвейера. Поэтому замерные площадки выбирались под обеими ветвями конвейера, причем ширина замерной площадки принималась равной ширине листов перекрытия, а длина равной шагу рамных опор. При этом фиксировалось время работы конвейера и его производительность, учитывалось состояние конвейерных лент (количество шарнирных стыков на ленте, проколы и прорывы ленты), эффективность работы очистных устройств.

Производились еженедельные взвешивания количества просыпей на замерных площадках.

Для того, чтобы выделить роль того или иного фактора в образовании просыпей, принимались следующие допущения:

- количество просыпей, образовавшихся в результате неудовлетворительной центровки ленты равно количеству просыпей, образовавшихся на конвейере, лента которого не имеет шарнирных стыков (стыки вулканизированы);
- величина просыпей через прорывы и проколы ленты приравнивается к величине просыпей через шарнирные стыки;
- постоянство влажности угля;
- эффективность очистных устройств составляет 80%, остальные 20% в виде просыпей распределяется по всей длине конвейерного става.

Результаты замеров суточных отложений просыпей приведены на рисунках 3.1 и 3.2 (положительные направление абсцисс от приводной станции по ходу движения холостой ветви конвейера).

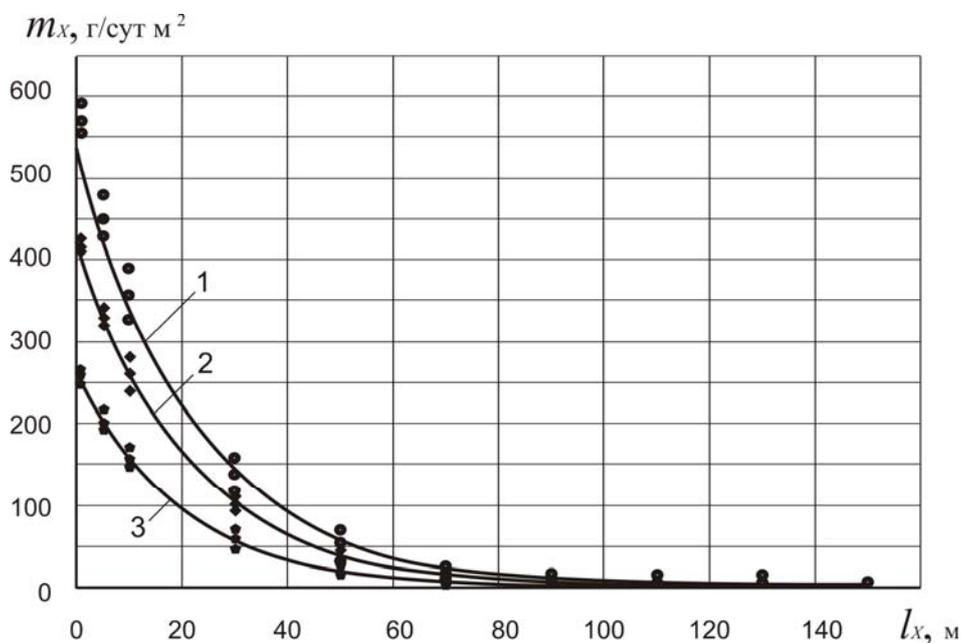


Рис. 3.1. График интенсивности отложения частиц угля под холостой ветвью конвейера в зависимости от его производительности:

1 – 1100 т/сут.; 2 – 800 т/сут.; 3 – 500 т/сут.

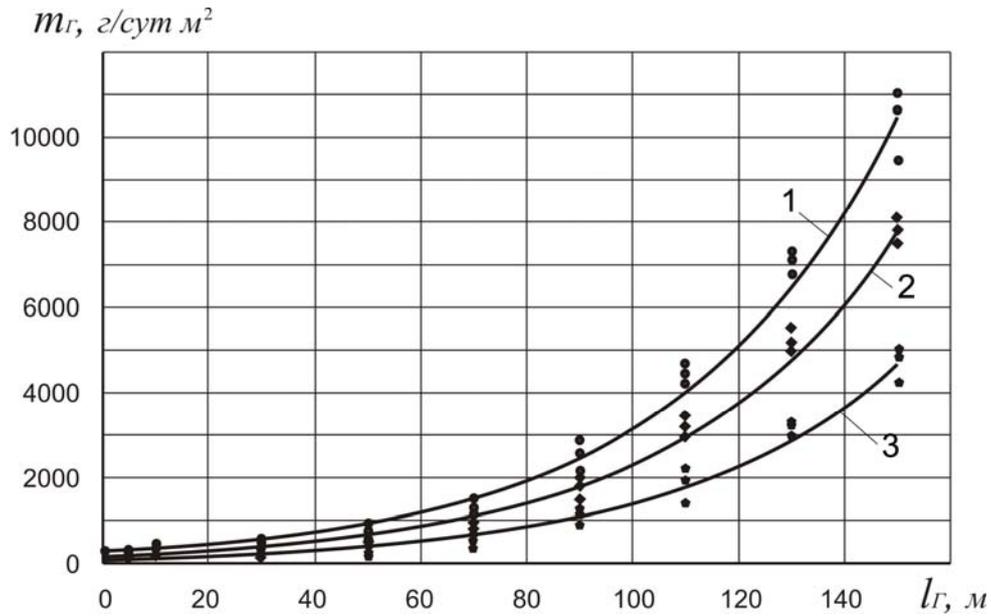


Рис. 3.2. График интенсивности отложения частиц угля под грузенной ветвью конвейера в зависимости от его производительности:

1 – 1100 т/сут.; 2 – 800 т/сут.; 3 – 500 т/сут.

При статистической обработке полученных результатов установлены зависимости, позволяющие определить суточную интенсивность просыпания как функцию длины конвейерной ленты при различной суточной производительности для холостой ветви:

- при $A_k = 500$ т/сутки

$$m_x = 262,3 \cdot \exp(-0,05 \cdot l_{II}), \text{ г/сут. м}^2; \quad (3.1)$$

- при $A_k = 800$ т/сутки

$$m_x = 418,75 \cdot \exp(-0,047 \cdot l_{II}), \text{ г/сут. м}^2; \quad (3.2)$$

- при $A_k = 1100$ т/сутки

$$m_x = 539,7 \cdot \exp(-0,045 \cdot l_{II}), \text{ г/сут. м}^2 \quad (3.3)$$

и для грузовой ветви:

- при $A_k = 500$ т/сутки

$$m_r = 129 \cdot \exp(0,0239 \cdot l_r), \text{ г/сут. м}^2; \quad (3.4)$$

- при $A_k = 800$ т/сутки

$$m_r = 201 \cdot \exp(0,0243 \cdot l_r), \text{ г/сут. м}^2; \quad (3.5)$$

- при $A_k = 1100$ т/сутки

$$m_{\Gamma} = 279,13 \cdot \exp(0,0242 \cdot l_{\Gamma}), \text{ г/сут. м}^2, \quad (3.6)$$

где m_X и m_{Γ} – масса просыпей на единицу площади, соответственно, под холостой и грузовой ветвями;

A_k – производительность конвейера т/сут;

Обобщив зависимости (3.1) – (3.6) с учетом изменения A_k для холостой и грузовой ветвей, можем записать

$$m_X = 0,87 \cdot A_k^{0,92} \cdot \exp(-0,047 \cdot l_X), \text{ г/сут. м}^2; \quad (3.7)$$

$$m_{\Gamma} = 0,3 \cdot A_k^{0,98} \cdot \exp(0,0241 \cdot l_{\Gamma}), \text{ г/сут. м}^2. \quad (3.8)$$

Суточная суммарная величина просыпей в подконвейерном пространстве может быть записана в виде интеграла

$$M = \int \int_S m dS_n, \quad (3.9)$$

где M – суммарная суточная величина просыпей г/сут;

S_n – поверхность, занятая просыпью, м².

Рассматривая S_n как прямоугольник, у которого одна сторона равна длине конвейера L_k , а другая – ширине b , интеграл (3.9) запишем в виде

$$M = \int_0^{L_k} m dx \int dy \quad (3.10)$$

или

$$M = b \int_0^{L_k} m dx, \quad (3.11)$$

где b – ширина поверхности занятая просыпью, которая для грузовой ветви равна ширине листов перекрытия, а для холостой – ширине ленты.

Используя для холостой и грузовой ветвей конвейера уравнения (3.7), (3.8) и (3.11) получим:

- для холостой ветви

$$M_X = 0,87 \cdot A_k^{0,92} b \int_0^{L_k} \exp(-0,047 \cdot x) dx, \text{ г/сут}; \quad (3.12)$$

- для грузовой ветви

$$M_{\Gamma} = 0,3 \cdot A_k^{0,98} b \int_0^{L_k} \exp(0,0241 \cdot x) dx, \text{ г/сут.} \quad (3.13)$$

После интегрирования выражений (3.12) и (3.13) получаем зависимости по определению суммарной величины просыпей в подконвейерном пространстве на участке конвейерной линии протяженностью L_k

$$M_X = 18,51 \cdot A_k^{0,92} b_l [1 - \exp(-0,047 \cdot L_k)], \text{ г/сут} \quad (3.14)$$

где b_l – ширина ленты.

$$M_\Gamma = 12,45 \cdot A_k^{0,98} b_\Pi [1 - \exp(0,0241 \cdot L_k)], \text{ г/сут} \quad (3.15)$$

где b_Π – ширина листов перекрытия.

Общая масса просыпей

$$M = M_X + M_\Gamma = 18,51 \cdot A_k^{0,92} b_l (1 - e^{-0,047 \cdot L_k}) + 12,45 \cdot A_k^{0,98} b_\Pi (1 - e^{0,0241 \cdot L_k}), \text{ г/сут} \quad (3.16)$$

Таким образом, суммарную суточную величину просыпей в подконвейерном пространстве на участке конвейера длиной L можно определить по зависимости (3.16).

Минимальное количество просыпи в подконвейерном пространстве соответствующее минимуму функции (3.16), определяется из уравнения

$$\frac{\partial f(L_k)}{\partial L_k} = 0,87 \cdot A_k^{0,92} b_l e^{-0,047 \cdot L_k} - 0,3 \cdot A_k^{0,98} b_\Pi e^{0,0241 \cdot L_k} = 0$$

откуда

$$L_{k \min} = 14,06 [\ln(2,9 \cdot b_l) - \ln(A_k^{0,06} b_\Pi)]$$

В процентном отношении количество просыпей под рабочей ветвью конвейера приближенно составляет 77%, под холостой ветвью 5% на узле перегрузки 18%.

Как показал опыт эксплуатации при производительности забоя 500т/сут, уборку просыпей следует производить не реже одного раза в сутки, в противном случае запыленность воздуха в выемочных штреках резко возрастает.

Установлено, что снизить запыленность воздуха в конвейерных штреках до предельно допустимой концентрации (ПДК) средствами вентиляции не представляется возможным. Снизить концентрацию пыли до ПДК в конвейерных штреках возможно путем ликвидации просыпей с помощью улучшения технического состояния конвейера и регулярной уборки просыпей в подконвейерном пространстве.

3.4. Экспериментальные исследования динамики запыленности воздуха в конвейерных выработках

Для проверки справедливости полученных математических моделей и определения численных значений их параметров проведены исследования в горных выработках, оборудованных конвейерами. Для наблюдений выбирались выемочные участки с гомотропальным проветриванием [104] (направление вентиляционной струи совпадает с направлением движения грузовой ветви конвейера). Запыленность воздуха определялась в 5 точках по длине горной выработки, измерялась также скорость воздушной струи. За начало отсчета ($L = 0$) принималась точка у перегрузочного пункта на сопряжении конвейерного штрека с лавой. В общей сложности отобрано 90 пылевых проб. Результаты измерения запыленности воздуха приведены на рис. 3.3. Установлено, что запыленность по длине конвейерной выработки (кривая 1) достаточно точно описывается уравнением (2.41) при следующих значениях его параметров: $C_0 = 50$ мг/м³; $j = 1$ мг/мс; $v = 0,5$, м/с; $Q = 2,5$ м³/с; $K_T = 0,0104$; . Коэффициент корреляции составил 0,92.

Кривая 1 получена при наличии под холостой и рабочей ветвью конвейера просыпей, которые приводят к повышенному пылеобразованию. Для оценки влияния просыпей на запыленность воздуха проводилась их уборка. Полученные после этого значения концентрации пыли представлены на рис.3.3 кривой 2, которая описывается уравнением (2.41) при $j = 0,3$ мг/м·с. Остальные значения параметров такие же, как и в первом случае.

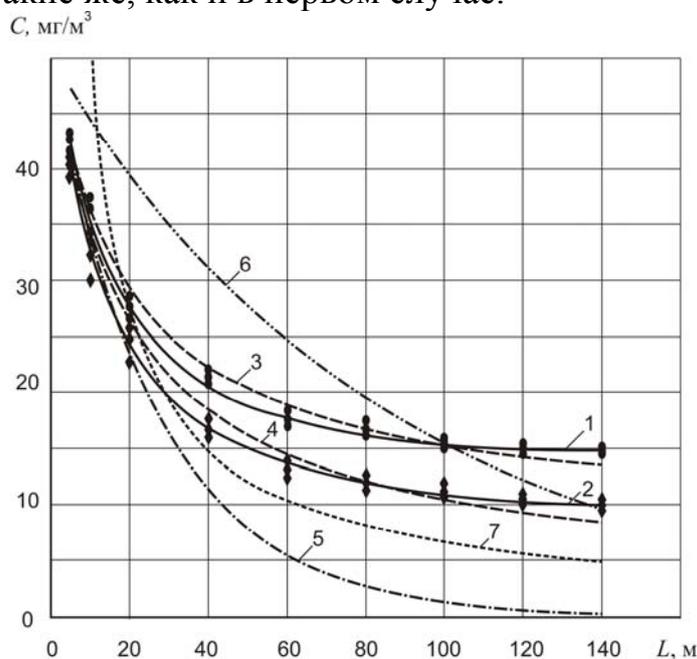


Рис.3.3. Изменение запыленности воздуха по длине выработки, оборудованной конвейером: 1 и 2 – по результатам экспериментов, соответственно при наличии просыпей и без них; 3 и 4 – теоретические расчеты по формуле автора; 5 – по формуле Дьякова В.В.; 6 и 7 – соответственно по формулам Хохлова Н.А и МакНИИ.

Полученные зависимости 1 и 2 удовлетворительно аппроксимированы функцией в виде экспоненты

$$C_1 = 32,66 \cdot \exp(-6,3 \cdot 10^{-3} \cdot L),$$

$$C_2 = 31,25 \cdot \exp(-9 \cdot 10^{-3} \cdot L).$$

Сравнивая кривые 1 и 2 между собой можно сделать вывод, что уборка просыпей существенно снижает запыленность воздуха в выемочном штреке, оборудованном конвейерами.

Для сравнения на рис.3.3 представлена также кривая 5, рассчитанная по формуле В.В. Дьякова [105]

$$n = n_0 \exp\left(-m \cdot \sqrt[4]{\frac{S}{Q^3}} \cdot L\right), \text{ мг/м}^3. \quad (3.17)$$

Формула (3.17) в условиях конвейерных выработок угольных шахт дает результаты, значительно отличающиеся от фактических. То же самое можно сказать и о кривой 6, построенной по эмпирической формуле Н.А. Хохлова [55]

$$n = n_0 \left[\exp\left(-0,015 \frac{L}{hv}\right) \right] + 4\Delta a \left(\frac{hv}{L}\right)^{0,58},$$

(здесь Δa – изменение абсолютной влажности воздуха на участке L , мг/м³, а h – средняя высота выработки на участке, м). В условиях угольных шахт Δa стремится к нулю, так как изменение относительной влажности составляет не более 1% на 200 м конвейерного штрека. Поэтому второй член уравнения также стремится к нулю.

Из других известных зависимостей, наиболее близкие результаты дает эмпирическая формула МакНИИ [34]

$$n = \frac{n_0}{0,25 + 0,075L}, \text{ мг/м}^3,$$

представленная на рис.3.3 кривой 7.

При сравнении экспериментальных кривых 1 и 2 с теоретическими 3 и 4 видно, что экспериментальные кривые более вогнуты и при значительном удалении ($L > 100$ м) от места с максимальной концентрацией пыли в конвейерном штреке они практически параллельны оси x . Это свидетельствует о том, что концентрация пыли в выработках, несмотря на наличие в них распределенного по длине источника пылеобразования, стабилизируется на определенном уровне и практически не зависит от длины выработки. Это явление объясняется оседанием части пыли образованной рассредоточенным по длине выработки источником пылеобразования. Большая степень вогнутости экспериментальных кривых объясняется тем, что в модели (2.41) учтены не все факторы оказываю-

щие влияние на осаждение пыли от точечного источника пылеобразования по длине выработки. Однако, несмотря на указанные различия в характере экспериментальных кривых по сравнению с теоретическими, последние позволяют более точно описать изменение концентрации по длине выработки при одновременном воздействии точечного и распределенного источников пылеобразования в горной выработке.

Таким образом, при достаточно большой длине конвейерных выработок ($L \rightarrow \infty$) концентрация пыли в них определяется в основном процессом пылеобразования от движущегося конвейера [37]. Эта концентрация сохраняет свое постоянство по длине конвейерной выработки. Постоянство концентрации пыли в вентиляционном потоке при работе конвейера (наличие пылевого фона) связано со сложными процессами взаимодействия потоков оседающей и взмываемой пыли [29]. Однако реальный процесс состоит в том, что при удалении от пылевого источника на определенное расстояние происходит падение концентрации пыли до ее фоновой величины, зависящей от конкретных условий, а дальше она остается приблизительно на одном уровне.

Для изучения влияния параметров вентиляционной струи на запыленность в конвейерных выработках проведены систематические измерения запыленности воздуха в этих выработках при различных режимах проветривания.

Измерения концентрации пыли производились на расстоянии не менее 100 м от сопряжения конвейерной выработки с лавой, чтобы исключить влияние пылеобразования при очистной выемке.

Результаты исследований представлены на рис.3.4 экспериментальными точками, которые показывают зависимость концентрации пыли C от скорости вентиляционной струи v в конвейерной выработке.

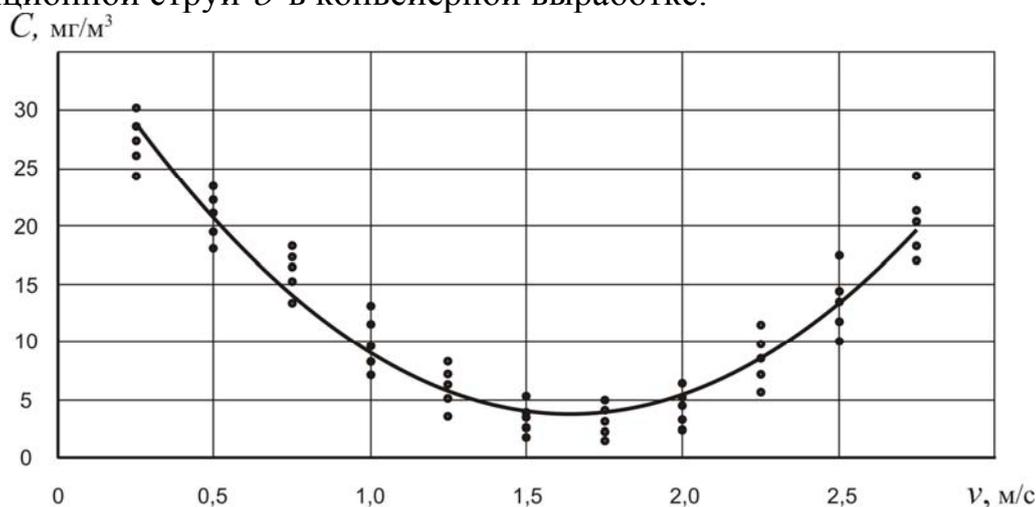


Рис. 3.4. График изменения запыленности воздуха C при различных режимах проветривания

Производительность конвейера составляла 400 т/сут. Влажность транспортируемого угля составляла в пределах 2,5...3 %. С увеличением влажности угля до 3,1...6,0%, оптимальная скорость вентиляционной струи повышается на 0,5—0,7 м/с [29]. При 7%-й и выше влажности пылеобразование в процессе перегрузки и транспортировки угля сводится к минимуму.

Полученная зависимость удовлетворительно аппроксимирована функцией $C = f(v)$ в виде полинома второй степени (квадратного трехчлена)

$$C = av^2 + bv + c, \quad (3.18)$$

где a, b, c – коэффициенты регрессии.

Полученная зависимость имеет следующий вид (с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,93$):

$$C = v^2 - 3,3 \cdot v + 3 \quad (3.19)$$

Исследуя функцию (3.19) на экстремум

$$\frac{\partial f(v)}{\partial v} = 2 \cdot v - 3,3 = 0,$$

откуда $v_0 = 1,65$ м/с. Т.е. минимальная запыленность $3,9$ мг/м³ в конвейерной выработке достигается при скорости воздушного потока $1,65$ м/с.

Полученное уравнение позволяет наглядно установить влияние скорости воздушного потока, на запыленность воздуха в конвейерной выработке.

Характер расположения кривой на рис.3.4 показывает, что существует определенная оптимальная величина скорости вентиляционной струи, превышение которой отрицательно сказывается на величине запыленности воздуха в конвейерной выработке.

Таким образом, скорость вентиляционной струи оказывает существенное влияние на величину запыленности в конвейерной выработке. Увеличение скорости воздушной струи до определенного предела способствует снижению запыленности воздуха в конвейерной выработке. Это происходит за счет разжижения пылевого облака. При дальнейшем повышении скорости вентиляционной струи приводит к более интенсивному выдуванию из-под холостой и рабочей лент конвейера просыпавшейся пыли, в связи с чем запыленность воздуха увеличивается.

Таким образом, полученное значение оптимальной скорости не позволяет снизить запыленность в конвейерных выработках до уровня ПДК. Поэтому для создания нормальных санитарно-гигиенических условий по пылевому фактору в выработках, оборудованных конвейерами необходима, в первую очередь, эффективная борьба с пылью.

Уровень запыленности в конвейерной выработке обуславливается тремя совместно действующими факторами: разбавлением пылевого облака чистым воздухом за счет турбулентной диффузии в движущемся потоке, выносом витающей пыли за пределы конвейерной выработки и интенсивностью пылеобразования источниками пыли (точечными источниками – при отбойке горной массы от массива горных пород и перегрузе, а также распределенным по длине выработки – при транспортировке горной массы конвейером).

Интенсивность пылеобразования от конвейера, как указывалось выше, определяется многими факторами, основными из которых являются его техни-

ческое состояние, режим проветривания и производительность при транспортировании горной массы.

На пылевую обстановку в конвейерных выработках существенное влияние оказывают процессы оседания пыли, поступившей через начальное сечение горной выработки. Однако наряду с оседанием пыли происходит ее образование по длине конвейерных линий и взметывание ее воздушным потоком. Первый из этих факторов способствует уменьшению запыленности воздуха, а второй приводит к тому, что на значительных расстояниях от точечных пылевых источников, когда влияние его на пылевую обстановку практически отсутствует, в вентиляционной струе сохраняется определенная концентрация пыли, даже если на почве или стенках выработки убрана осажденная пыль. Постоянство концентрационного фона поддерживается за счет сложного механизма взметывания и оседания пыли, который в силу его слабой изученности приводит к качественному расхождению теоретических результатов с экспериментальными данными [29]. Причиной этому является то, что граничные условия при описании движения частиц в турбулентном потоке уравнением диффузии в потоке не отражают реального процесса, который, как отмечалось ранее, состоит в том, что при удалении от пылевого источника на расстояние порядка десятка метров происходит падение концентрации пыли до ее фоновой величины, зависящей от конкретных условий, а дальше она остается приблизительно на одном уровне.

Оценить влияние на фоновую запыленность процессов взметывания пыли за счет ее сдувания с поверхности выработки и повторного оседания (по принципу «бархан» или массопереноса) весьма сложно. На первый взгляд представляется возможным учесть оседание и взметывание [29], поскольку над шероховатой поверхностью почвы коэффициент турбулентной диффузии пыли отличен от нуля, а при наличии на ней осажденной пыли граничное значение ее концентрации на почве совпадает с насыпной плотностью. Однако при таком подходе из-за очень малой скорости гравитационного оседания пылинок концентрация пыли даже на удалении от источника получается соизмеримой с ее насыпной плотностью.

Если несоответствие теоретических результатов экспериментальным данным в первых двух случаях легко объясняется принятием слишком идеализированных граничных условий при решении уравнения распространения пыли, то причина парадоксального результата, получающегося при последнем подходе, более глубока. Для ее объяснения авторами работ [97, 106] была высказана гипотеза о механизме взметывания пыли с почвы горной выработки: в турбулентном потоке над шероховатой поверхностью пыль взметывается не отдельными частицами, а в виде пылевых образований – сгустков (облачков), которые затем рассыпаются на отдельные пылинки.

Благодаря пылевым сгусткам скорость их гравитационного оседания вследствие экранирующей способности может быть намного больше, чем у отдельных частиц, в результате чего обеспечивается значительное падение концентрации пыли в потоке по сравнению с ее насыпной плотностью в осажденном состоянии. Для непосредственного подтверждения гипотезы и уточнения количественных характеристик данного процесса авторами работы [29] были

проведены исследования процесса взметывания пыли с поверхности горных выработок, в которых дана оценка влиянию на фоновую запыленность этих процессов.

В связи с вышеуказанным, с целью исключения влияния процессов рассмотренных выше, для определения фоновой концентрации образованной работой конвейера, был выбран участок свежееубранной конвейерной выработки на расстоянии 400 м от лавы с типовой площадью сечения 5 м^2 , периметром 9 м, при $v_{cp} = 0,5 \text{ м/с}$ и $B = 0,0245$.

При изменении производительности конвейера фоновая концентрация в выработке изменяется по кривой представленной на рис. 3.5.

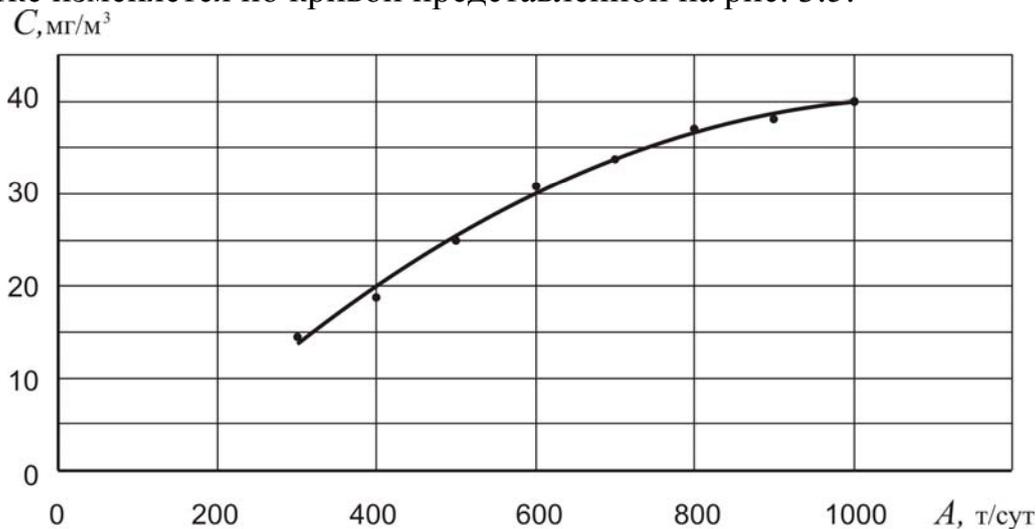


Рис. 3.5. Зависимость фоновой концентрации C_k от величины производительности конвейера A .

Полученный график описывается уравнением вида полинома второй степени

$$C_k = -5 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 + 0,0913 \cdot A - 10,008, \text{ мг/м}^3 \quad (3.20)$$

с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9942$.

На фоновую концентрацию существенное влияние оказывает вентиляционный режим в конвейерной выработке, поэтому при исследовании динамики фоновой концентрации измерения выполнялись при различных скоростях вентиляционной струи.

Анализ результатов исследований, представленных на рис 3.6 свидетельствует о том, что фоновая концентрация в выработке обусловленная работой конвейера, при определенных условиях может быть величиной постоянной и оставаться на одном уровне. Однако при определенных обстоятельствах величина концентрационного фона в конвейерной выработке может существенно измениться, что может привести к существенному ухудшению санитарно-гигиенических условий труда и уровня безопасности на рабочих местах.

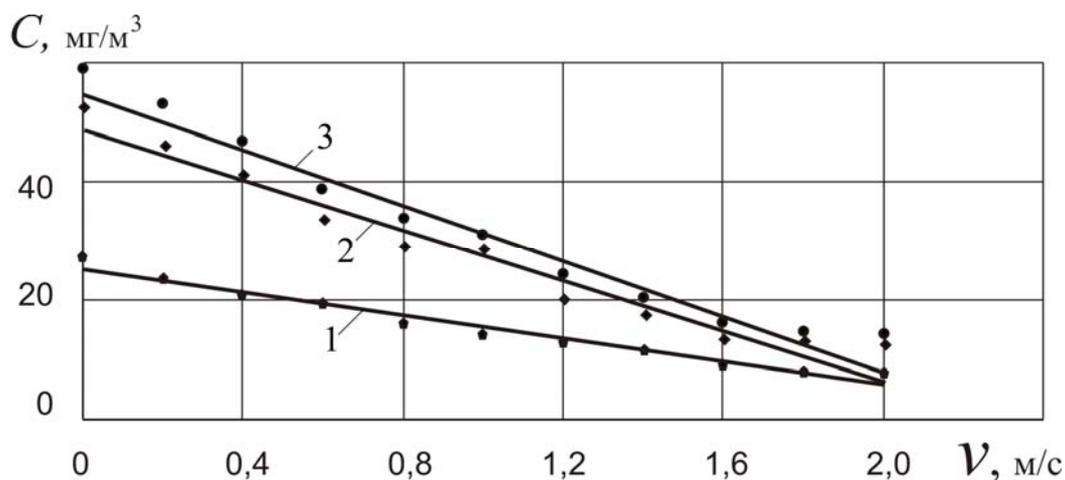


Рис. 3.6. График зависимости концентрационного фона C от скорости вентиляционной струи v для разной производительности конвейера при его работе: 1, 2 и 3 – соответственно, при производительности конвейера 500, 700 и 1000 т/сут.

При наличии источников непрерывного выделения пыли, интенсивность пылевыведения в проветриваемой выработке всегда больше, чем в непроветриваемой [105]. Это явление связано с тем, что в проветриваемой выработке на процесс образования аэрозоля при непрерывном выделении пыли существенное влияние оказывают динамические параметры вентиляционного потока.

Для проверки справедливости утверждения [105] в условиях работы конвейера, а также для определения значения j_0 были выполнены исследования, сущность которых заключалась в определении интенсивности пылевыведения во время работы конвейера при разных значениях скорости вентиляционной струи, а также для разной производительности конвейера. Для этого при каждом режиме проветривания производилось измерение средней запыленности воздуха в конвейерной выработке.

Отбор пылевых проб производился только во время работы конвейера. Одновременно с отбором пылевых проб измерялись скорость движения и расход воздуха в выработке, фиксировались время чистой работы конвейера и определялась его производительность.

Интенсивность пылевыведения при каждом режиме проветривания рассчитывалась по формуле (2.46)

$$j = C_k S(v + 0,0245), \text{ мг/с}$$

Результаты экспериментов (рис.3.7) свидетельствуют об увеличении интенсивности пылевыведений от работающего конвейера при увеличении скорости вентиляционного потока и производительности конвейера.

Полученные экспериментальные точки образуют линии с наклоном к оси абсцисс, что подтверждает справедливость утверждений и исследования выполненные ранее [105]. Тангенс угла наклона линий к оси абсцисс численно равен коэффициенту β . Ордината точки пересечения линий с осью ординат на

рис. 3.7 соответствует j_0 . Отношение параметра β к j_0 зависит от производительности конвейера, его технического состояния, физико-механических свойств горных пород и средств пылеподавления.

Таким образом, основными параметрами, оказывающими существенное влияние на величину концентрационного фона в конвейерной выработке, являются: техническое состояние конвейера, его производительность, количество осажденной пыли в подконвейерном пространстве, скорость вентиляционной струи, свойства отбиваемой от массива и транспортируемой горной массы, свойства пыли, а также аэродинамические параметры пылевого и вентиляционного потоков. Скорость вентиляционной струи является строго регламентируемым параметром, свойства горной массы и пыли обусловлены природными факторами и существующей технологией добычи угля, аэродинамические параметры воздушных и пылевых потоков обусловлены применяемой крепью горных выработок и оборудованием которое находится в них, поэтому для улучшения санитарно-гигиенических условий труда и повышения уровня безопасности ведения основных технологических работ по добыче и транспортировке угля необходимо разрабатывать мероприятия, способы и технические средства для снижения уровня накопления угольной пыли в конвейерной выработке, особенно в таких труднодоступных местах с высокой потенциальной опасностью во время аварийной ситуации, каким является подконвейерное пространство.

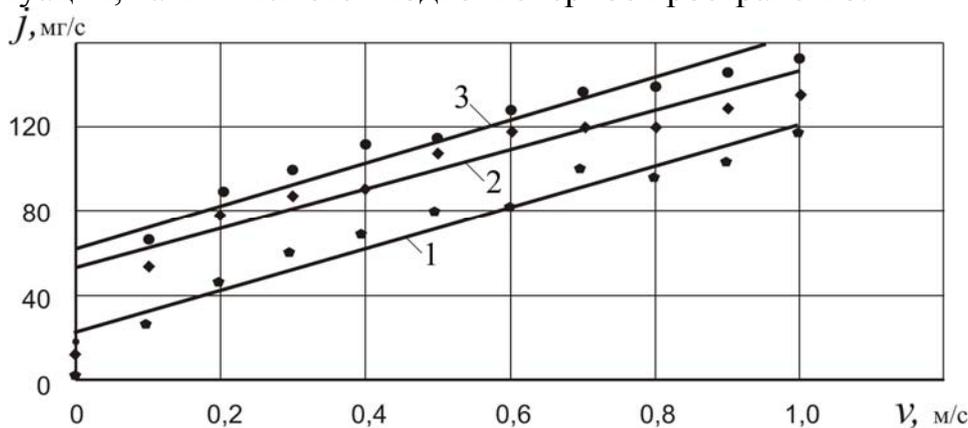


Рис. 3.7. График зависимости интенсивности пылеобразования j от скорости вентиляционной струи v для разной производительности конвейера при его работе: 1, 2 и 3 – соответственно, при производительности конвейера 500, 700 и 1000 т/сут.

Основные результаты выполненных исследований и приведенных в настоящей главе сводятся к следующему:

- в конвейерных выработках угольных шахт наряду с оседанием пыли происходит ее образование на всем протяжении конвейерных линий как от распределенного по длине выработки источника;

- при значительном удалении от пункта погрузки угля на конвейер концентрация пыли в выработках стабилизируется и определяется в основном пылевыделением конвейера;

- увеличение скорости воздушного потока в конвейерной выработке до определенного предела способствует снижению запыленности воздуха за счет разжижения пылевого облака, а далее к ее росту за счет более интенсивного выдувания пыли, просыпавшейся из-под холостой и рабочей лент конвейера;

- оптимальная скорость воздушной струи противопылевой вентиляции, которая соответствует минимуму запыленности и составляет около 1,65 м/с, не позволяет снизить запыленность в конвейерных выработках до уровня ПДК, что обуславливает необходимость эффективной борьбы с пылью;

- на интенсивность пылеобразования и фоновую концентрацию в конвейерной выработке оказывает существенное влияние производительность конвейера и параметры проветривания. Результаты исследований свидетельствуют об увеличении интенсивности пылевыделений от работающего конвейера при увеличении скорости вентиляционного потока и производительности конвейера. Полученные экспериментальные точки образуют линии с наклоном к оси абсцисс, что подтверждает справедливость утверждений и исследования выполненные ранее;

- сравнение экспериментальных зависимостей с теоретическими свидетельствует об их адекватности. Однако экспериментальные кривые более вогнуты, что объясняется неучтенными факторами, а при значительном удалении ($L > 100$ м) от места с максимальной концентрацией пыли в конвейерном штреке они практически параллельны оси x . Это свидетельствует о том, что концентрация пыли в выработках, несмотря на наличие в них распределенного по длине источника пылеобразования, стабилизируется на определенном уровне и практически не зависит от длины выработки. Это явление объясняется оседанием части пыли образованной рассредоточенным по длине выработки источником пылеобразования;

- полученные зависимости позволяют более точно описать изменение концентрации по длине выработки при одновременном воздействии точечного и распределенного источников пылеобразования в горной выработке.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ КОНВЕЙЕРНЫХ ВЫРАБОТОК

4.1 Способы и средства снижения пылеотложений в подконвейерном пространстве конвейерных выработок.

Подконвейерное пространство – это пространство в конвейерной выработке ограниченное в верхней его части холостой ветвью конвейера, а в нижней части почвой выработки.

Выработки, оборудованные конвейерным транспортом, особо опасны в отношении возникновения и распространения по ним взрывов угольной пыли. Об этом свидетельствует самая крупная авария в Донбассе по катастрофическим последствиям, которая произошла на шахте им. Баракова (г. Краснодон). В работе [15] представлены результаты расследования аварии, которые свидетельствуют о том, что взрыв пылевоздушной смеси произошёл в 31-м западном штреке на сопряжении с магистральным штреком и распространился навстречу свежей струе вдоль этого штрека (длина 650 м), воздухоподающему ходку (700 м), по полю 27-й лавы (250 м) и центральному вентиляционному ходку (1300 м) вплоть до загрузочного бункера скипового ствола.

На пути распространения взрыва сработало шесть сланцевых заслонов, в том числе два в 31-м западном штреке и четыре в центральном вентиляционном ходке. Тем не менее пламя взрыва распространялось по сети выработок так, как будто этих заслонов не было. Хотя при отсутствии загазирования выработок и слоевых скоплений метана (в выработках аварийного участка были взрывоопасные отложения угольной пыли, но метан не обнаружен) достаточно сработать заслону, ближайшему к центру взрыва, чтобы его локализовать, т. е. погасить пламя.

Единственным объяснением такого характера развития аварии является то, что взрывное горение распространялось в изолированном от выработки пространстве. На шахте уголь по наклонным и горизонтальным выработкам транспортируется ленточными конвейерами 1Л-100К, причём в 31-м штреке линия состояла из четырёх последовательных конвейеров. Учитывая это, а также то, что пыль пласта с выходом летучих веществ 29,9% является весьма взрывчатой, можно предположить, что взрыв пылевоздушной смеси беспрепятственно распространялся по стационарной конвейерной линии, подконвейерное пространство в данном случае выполняло функцию проводника. Этот вывод подтверждается и состоянием аварийных выработок после взрыва: - по всей длине 31-го штрека ленточные конвейера разрушены, роlikоопоры сбиты и частично разбросаны по выработке; - по всей длине центрального ходка роlikоопоры сбиты с канатов, пожарно-оросительный и воздушный трубопроводы разорваны в трёх местах, а в пяти образовались вывалы объёмом 1,5-4 м³, - разрушена телефонная связь и сигнализация конвейеров; - элементы всех сработанных заслонов располагались практически в месте их установки – длина запылённого участка выработки не превышала 40 м.

При транспортировании угля конвейерами, в подконвейерном пространстве (под рабочей и холостой ветвями конвейерной ленты) образуются просыпи угольной мелочи диаметром от 1 до 15 мм, содержание пыли в которой составляет более 40% [16]. Нерегулярная уборка этих просыпей приводит к постепенному заполнению ими подконвейерного пространства, что приводит к интенсивному пылеобразованию за счет увеличения трущихся поверхностей на конвейере и вымывания пылевых частиц вентиляционной струей. При образовании просыпей, последние скапливаются сначала вблизи поддерживающих роликов, а затем постепенно распространяются на всю площадь под холостой и рабочими ветвями конвейера. Пылеобразование в конвейерной выработке увеличивается после того, как просыпи начинают соприкасаться с вращающимися роликами и движущейся конвейерной лентой. Чем больше площадь такого контакта, тем больше пылеобразование. При контакте мелкие частицы угля (просыпи) и заключенные между ними пылевые микроструктуры разрушаются, и частицы переходят во взвешенное состояние.

Таким образом, для снижения пылеобразования в конвейерных выработках, необходимо регулярно осуществлять уборку просыпи в подконвейерном пространстве. Ручная уборка конвейерной просыпи очень трудоемка и непроизводительна. Это связано со стесненными габаритами ленточного конвейера по высоте. Кроме того при ручной уборке увеличивается пылеобразование по выработке. Поэтому необходимы более эффективные способы и средства уборки просыпей в подконвейерном пространстве.

В подконвейерное пространство пыль поступает в результате воздействия динамических характеристик потока воздуха движущегося по конвейерной выработке. Некоторое влияние на попадание пыли в подконвейерное пространство оказывают и другие явления (эжектирующее действие конвейерной ленты, действие электростатических сил и др.).

Уменьшение отложения пыли в подконвейерном пространстве можно достичь снижением запыленности воздуха поступающего в конвейерную выработку за счет использования эффективных герметизирующих устройств на перегрузе, очисткой конвейерной ленты от налипания горной массы, периодической уборкой пыли, предупреждением пылеотложений в подконвейерном пространстве по длине выработки за счет создания в подконвейерном пространстве ввоздушной завесы, а также средствами аварийной защиты конвейера при условии заштыбовки конвейера большим количеством просыпей в результате чрезвычайных ситуаций.

Для предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве, в нем по длине конвейерной выработки прокладывается нагнетательный трубопровод с равномерной раздачей воздуха по длине (рис. 4.1, 4.2), а также два всасывающих трубопровода, расположенных симметрично относительно нагнетательного трубопровода. По нагнетательному трубопроводу подается воздух, который при выходе из боковых отверстий создает в подконвейерном пространстве воздушный поток, который препятствует попаданию в него пыли.

Благодаря созданной в подконвейерном пространстве воздушной завесы, пыль, выпадающая из движущегося по конвейерной выработке вентиляционно-

го потока, а также пыль вновь образованная в результате работы конвейера не оседает в подконвейерном пространстве и, таким образом, полностью исключается ее накопление в нем.

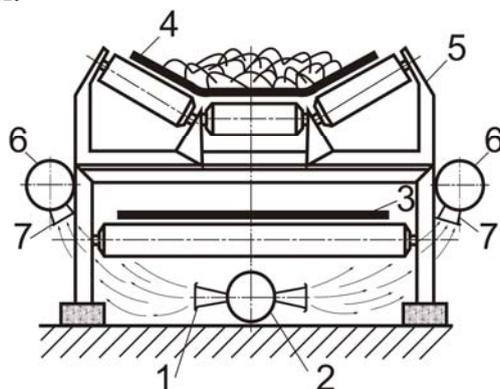


Рис. 4.1. Схема расположения нагнетательного трубопровода с равномерной раздачей воздуха и всасывающих трубопроводов по длине для предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве конвейерных выработок:

1 – выпускное отверстие (сопло); 2 – нагнетательный трубопровод; 3 – холостая ветвь конвейерной ленты; 4 – грузовая ветвь конвейерной ленты; 5 – роlikоопора; 6 – всасывающие трубопроводы; 7 – всасывающие отверстия.

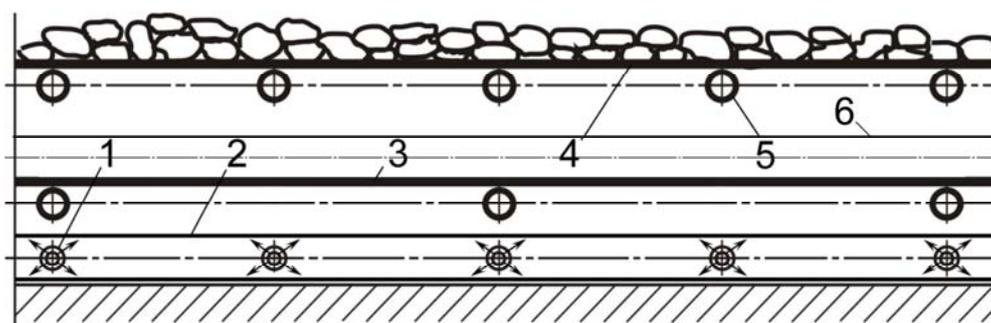


Рис. 4.2. Схема устройства для предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве (вид сбоку):

1 – выпускное отверстие (сопло); 2 – нагнетательный трубопровод; 3 – холостая ветвь конвейерной ленты; 4 – грузовая ветвь конвейерной ленты; 5 – роlikоопоры; 6 – всасывающий трубопровод.

Для обеспечения эффективной работы предлагаемого устройства, необходимо определить параметры устройства на основании теории установившегося движения потока с изменением расхода вдоль пути [107 – 113] и метода встречных струй [114 – 116].

4.2. Обоснование основных параметров средств снижения интенсивности пылеотложений.

При использовании периодических способов предупреждения взрывов угольной пыли (повторяющаяся уборка пыли после ее накопления) интенсивность пылеотложения P , г/(м³·сут) является показателем определяющим необ-

ходимую периодичность пылевзрывозащитных мероприятий. Он также является важнейшей характеристикой пылевзрывоопасности горных выработок [11].

Основным параметром эффективности способов предупреждения взрывов угольной пыли является время защитного действия T_3 , которое для большинства мероприятий больше времени накопления T_n взрывоопасного количества пыли [24]. Оно зависит от интенсивности пылеотложения в выработках P , нижнего предела взрывчатости δ , а также характерного показателя эффективности E рассматриваемого способа [117]. Этот параметр показывает, во сколько раз время защитного действия способа больше времени накопления взрывоопасного количества пыли T_n .

Таким образом, показатель эффективности E можно записать как отношение

$$E = \frac{T_3}{T_n}.$$

Тогда продолжительность защитного действия способа может быть определена по формуле

$$T_3 = \frac{\delta}{P} E, \text{ сут} \quad (4.1)$$

С учетом (2.68) и (4.1) продолжительность защитного действия способа для конвейерной выработки может быть определена по формуле

$$T_3 = \frac{\delta E}{S\nu C_0 \left(1 - \frac{1}{1 + B_2 \frac{L}{\nu}} \right) + q(L) \left(L m_0^4 \sqrt{\frac{S}{Q^3} - 1} \right) \exp \left(- L m_0^4 \sqrt{\frac{S}{Q^3}} \right)}. \quad (4.2)$$

Безразмерный показатель эффективности E может изменяться для различных способов от 0 до ∞ и позволяет дифференцировать способы на периодические, когда E принимает конечные значения, и непрерывные (при $E \rightarrow \infty$). Вполне понятно, чем больше E , тем эффективнее способ, тем в более широком диапазоне условий в выработках он может применяться [117].

При осланцевании горных выработок время защитного действия равно времени накопления взрывоопасного количества пыли ($T_{\text{осл}} = T_n$), поэтому $E=1$. В связи с этим, показатель E может служить также коэффициентом сравнения эффективности рассматриваемого способа с осланцеванием [120].

Для сухой уборки пыли показатель эффективности E для данного вида предупреждения взрывов угольной пыли определяется выражением [117]

$$E_c = 1 - \frac{2P_{ост}}{PR_3}, \quad (4.3)$$

где $P_{ост}$ – остаточное пылеотложение после сухой уборки пыли, кг/м²;
 R_3 – эквивалентный радиус выработки, м.

Предотвращение попадания пыли в подконвейерное пространство является задачей, решение которой возможно при создании в этом пространстве воздушного потока препятствующего проникновению в него пылевых потоков образовавшихся за пределами подконвейерного пространства

Работа предлагаемой аэродинамической системы (рис. 4.3) связана с двумя, одновременно происходящими процессами: процессом взаимодействия встречных струй системы и пылевых потоков; процессом взаимодействия между собой спутных струй формируемых многоканальной воздухораспределительной системой.

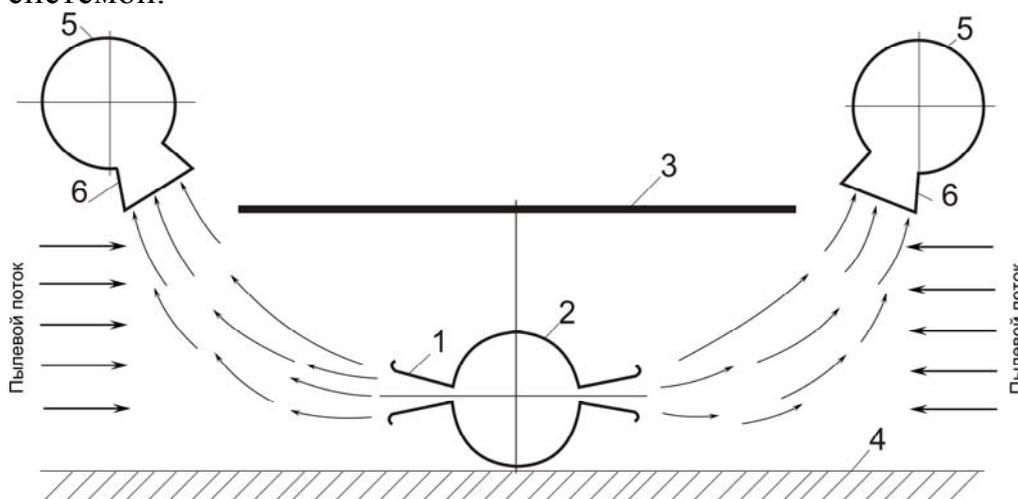


Рис. 4.3. Аэродинамическая схема устройства предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве:

1 – выпускное отверстие (сопло); 2 – нагнетательный трубопровод; 3 – холостая ветвь конвейерной ленты; 4 – почва выработки; 5 и 6 – соответственно, всасывающие трубопроводы и патрубки.

Параметры элементов устройства предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве можно определить из выражения (4.4), полученного на основании процесса установившегося движения потока с изменением расхода вдоль пути движения воздуха по трубопроводу [108], который имеет место в нашем случае.

Зная расход q раздаваемый на единице длины трубопровода, и давление в каждом сечении $\frac{P}{\gamma}$, можно определить размеры отверстия, пропускающего этот расход [108]

$$q = \mu s \sqrt{2g \frac{P}{\gamma}}, \quad (4.4)$$

где s – площадь поперечного сечения отверстия;

μ - коэффициент расхода, который равен 0,33...0,63 [108].

Если отверстие круглое, то расчетная формула (4.4) примет вид

$$d = 0,534 \cdot \left(\frac{q}{\mu}\right)^{0,5} \left(\frac{\gamma}{P}\right)^{0,25} \quad (4.5)$$

или

$$d = 0,755 \cdot q^{0,5} \left(\frac{\gamma}{P}\right)^{0,25} . \quad (4.6)$$

Для обеспечения одинакового расхода через все отверстия по длине трубопровода, необходимо определить изменение сечения трубопровода по его длине (с уменьшением расхода по пути движения воздуха, для обеспечения равномерной раздачи воздуха через отверстия, необходимо уменьшать сечение трубопровода длине, т.е. выполнить его в виде конуса).

Чтобы выполнить трубопровод в виде конуса, достаточно определить его начальный и конечный диаметры. Изготовление такого конусного трубопровода представляет собой некоторую сложность, поэтому для упрощения, конусообразность трубопровода можно обеспечить за счет соединения нескольких цилиндрических звеньев труб с постепенным уменьшением их диаметров. В случае, если весь подаваемый расход воздуха раздается по пути его движения, то конечный диаметр трубопровода равен диаметру отверстия для раздачи воздуха. Начальный диаметр трубопровода зависит от количества отверстий в нем, величин расхода в этих отверстиях при раздаче воздуха, а также диаметра отверстий. Все эти параметры рассчитываются по известным формулам для определения параметров элементов гидравлических систем [107 – 113, 118].

4.3. Обоснование параметров аспирационного укрытия узла перегрузки ленточного конвейера.

Одним из способов борьбы с высокой запыленностью воздуха в конвейерных выработках является устройство аспирационных укрытий на пунктах перегруза с конвейера на конвейер горной массы (рис. 4.4).

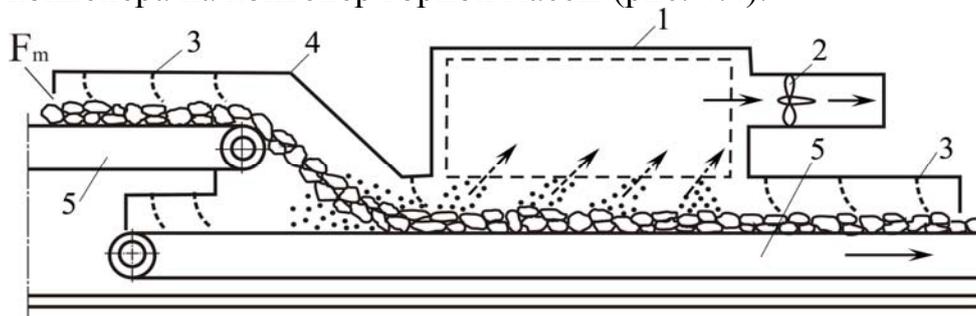


Рис. 4.4. Схема аспирации на перегрузе: 1 – тканевый пылеотделитель; 2 – вентилятор; 3 – гибкая перемычка; 4 – укрытие; 5 – конвейер.

Возможность снижения содержания пыли в воздухе рабочей зоны на основе оборудования аспирационных укрытий достаточно широко исследована и довольно успешно применяются на практике [119]. Несмотря на это, при создании аспирационных укрытий, где движутся потоки полезного ископаемого, возникают вопросы, решение которых требует учета динамики движущихся материалов и их воздействия на потоки аспирируемого воздуха. Для обоснования параметров аспирационного укрытия с учетом воздействия транспортируемой горной массы на потоки аспирируемого воздуха, необходим детальный анализ воздухообмена в укрытии узла перегрузки с конвейера на конвейер, поскольку при движении горной массы происходит эжектирование воздуха. Поэтому, целью данной работы является разработка метода расчета аспирационного укрытия, позволяющего учитывать динамику движущейся горной массы и ее воздействие на потоки аспирируемого воздуха.

Аспирационный расчет для узла перегрузки, оборудованного укрытием, воздухопроводом, побудителем тяги (вентилятором) и устройством для очистки воздуха [120, 121] производится по известной формуле [122]:

$$Q = Q_H + Q_{ж}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где Q – количество воздуха, которое необходимо отсасывать из укрытия, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_H – количество воздуха, поступающего в укрытие через неплотности и рабочие проемы, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{ж}$ – количество воздуха, эжектируемого потоком горной массы и поступающего в укрытие, $\text{м}^3/\text{с}$.

Количество воздуха, поступающего в укрытие через неплотности и рабочие проемы, определяется по формуле [122]

$$Q_H = \mu \cdot F_H \sqrt{\frac{2P}{\rho_0}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где μ – коэффициент расхода воздуха через неплотности в укрытии ($\mu = 0,65$);

F_H – общая площадь неплотностей в укрытии, м^2 ;

P – заданное разрежение в укрытии, $\text{Н}/\text{м}^2$;

ρ – плотность поступающего в укрытие воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Наибольшую трудность при проектировании аспирационных систем представляет определение количества воздуха, поступающего в укрытие с транспортируемым материалом $Q_{ж}$ [122], что объясняется сложностью процесса взаимодействия материала с воздухом, а также необходимостью учета аэродинамических свойств технологического оборудования, создающих избыточное давление в укрытиях.

Для определения количества воздуха, эжектируемого горной массой, экспериментально определены величины скоростей воздуха над конвейерной лентой. Для этого над конвейерной лентой перпендикулярно потоку горной массы устанавливалась фигурная решетка с ячейкой $0,05 \times 0,05$ м и определялась ско-

рость потока воздуха в каждой ячейке. Обработанные результаты всех замеров позволили построить эпюры скоростей потоков (рис 4.5).

Графики скорости потока воздуха при удалении от транспортируемой горной массы по высоте для различных скоростей конвейерной ленты, полученные на основании исследований, представлены на рис. 4.6.

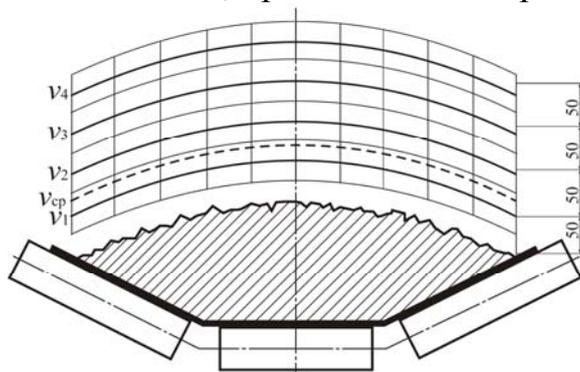


Рис. 4.5. Эпюры скоростей воздушного потока над движущейся транспортной лентой с горной массой

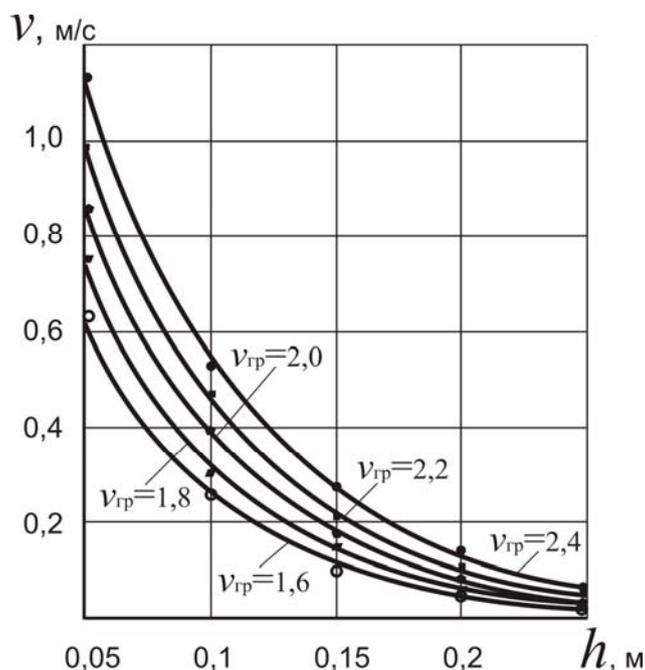


Рис. 4.6. Зависимость скорости эжектируемого потока воздуха от расстояния до горной массы при различных скоростях ее транспортирования.

Аппроксимация экспериментальных данных производилась уравнением вида

$$v = a \cdot e^{-bh}, \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты;

h – расстояние от транспортируемой горной массы по высоте, м.

В результате математической обработки опытных данных были получены зависимости величин v от h для различных скоростей перемещения горной массы (табл. 4.1):

Таблица 4.1.

Значения коэффициентов a и b при различных скоростях транспортирования горной массы

Скорость транспортирования горной массы, м/с	Коэффициент a	Коэффициент b
1,6	1,5	17,43
1,8	1,68	16,51
2,0	1,87	15,7
2,2	2,08	15,0
2,4	2,27	14,27

Из полученных выражений видно, что коэффициенты a и b изменяются в зависимости от величины $v_{гр}$.

Уравнения прямых, представленных на рис. 4.7, 4.8 с учетом изменения a и b от величины $v_{гр}$ имеют вид:

$$a = 0,98 \cdot v_{gp} - 0,08; \quad (4.2)$$

$$b = 23,6 - 3,9v_{gp} \quad (4.3)$$

Подставляя (4.2) и (4.3) в выражение (4.1) получим зависимость скорости эжектируемого потока воздуха v от высоты h и значений $v_{гр}$

$$v = (0,98 \cdot v_{gp} - 0,08) \exp[(3,9 \cdot v_{gp} - 23,6) \cdot h], \text{ м/с}$$

где v_{gp} – скорость перемещения горной массы с конвейерной лентой, м/с.

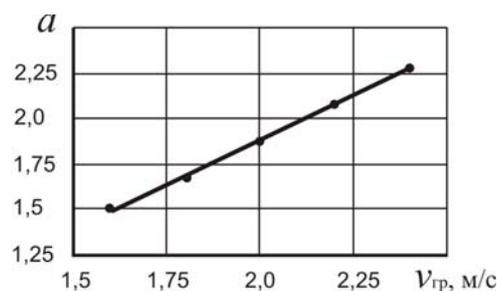


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента a от скорости перемещения горной массы

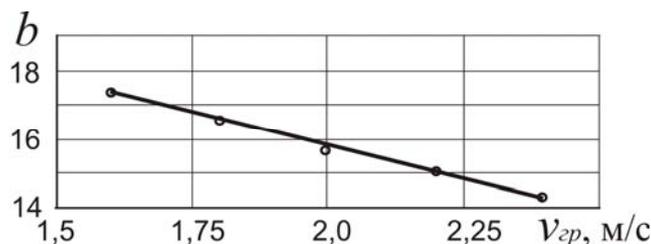


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента b от скорости перемещения горной массы

В связи с тем, что сечение входного отверстия для горной массы в укрытии может быть различным по высоте, то определим среднюю скорость в зависимости от h

$$v_{cp} = \frac{1}{h} \int v dv.$$

Решая это уравнение, находим

$$v_{cp} = \frac{1}{h} \int_0^h (0,98 \cdot v_{cp} - 0,08) \exp[(3,9 \cdot v_{cp} - 23,6) \cdot h] dh, \text{ м/с}$$

или

$$v_{cp} = \frac{1}{h} \left[\frac{0,98 \cdot v_{cp} - 0,12}{(23,6 - 3,9 \cdot v_{cp})h} \right] \{1 - \exp[(3,9 - 23,6)h]\}.$$

Зная площадь технического проема F_m , скорость движения транспортной ленты v_{cp} и высоту технологического проема h , можно определить количество эжектируемого воздуха по формуле

$$Q_{ж} = \mu' \cdot F_m \cdot v_{cp}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где μ' – коэффициент расхода воздуха через технологический проем. $\mu' = (0,87 - 0,9)$.

Тогда

$$Q_{ж} = \mu' \cdot F_m \frac{0,98 v_{cp} - 0,08}{(23,6 - 3,9 \cdot v_{cp})h} \{1 - \exp [(3,9 \cdot v_{cp} - 23,6)h]\}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Откуда получаем количество аспирируемого воздуха для укрытия:

$$Q = 0,65 F_H \sqrt{\frac{2P}{\rho_0}} + \mu' F_m \frac{0,98 v_{cp} - 0,08}{(23,6 - 3,9 \cdot v_{cp})h} \{1 - \exp [(3,9 \cdot v_{cp} - 23,6)h]\}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

4.4. Разработка способов и средств повышения уровня безопасности конвейерного транспорта.

При эксплуатации конвейерной транспортной системы в горных выработках шахт и рудников возникают аварийные ситуации, которые оказывают существенное влияние на уровень безопасности и технико-экономические показатели всей шахты. Многие из таких аварий приводят к тяжелым материальным и социальным потерям.

Довольно часто возникает ситуация, когда лента пробуксовывает на приводном барабане. При пробуксовке ленты на футеровке барабана, последняя нагревается и при достижении определённой температуры возможно загорание ленты и возникновение пожара [12, 123, 13]. В угольной шахте это может быть причиной взрыва пылегазовоздушной среды с дальнейшими тяжёлыми последствиями, в рудной, причиной заполнения горных выработок продуктами сгорания с опасными для жизни горнорабочих концентрациями в рудничной атмосфере.

В связи с вышеуказанным, разработка способов и средств защиты конвейерного транспорта от аварий с целью повышения уровня их безопасности в сложных горногеологических условиях шахт и рудников весьма актуальна.

Существует много конструкций защиты от пробуксовки ленты на приводном барабане. Одна из наиболее распространённых – это с датчиком скорости ленты, обеспечивающий отключение привода в случае пробуксовки.

Одним из существенных недостатков данной системы защиты является ее инерционность, что приводит к высокотемпературному нагреванию ленты в момент пробуксовки до полной остановки приводного барабана.

С целью повышения эффективности работы защиты от пробуксовки ленты на приводном барабане, в работе [3] предлагается дополнительно установить непосредственно на приводном барабане температурный датчик. На рис.4.9 изображено устройство для предупреждения скольжения конвейерной ленты.

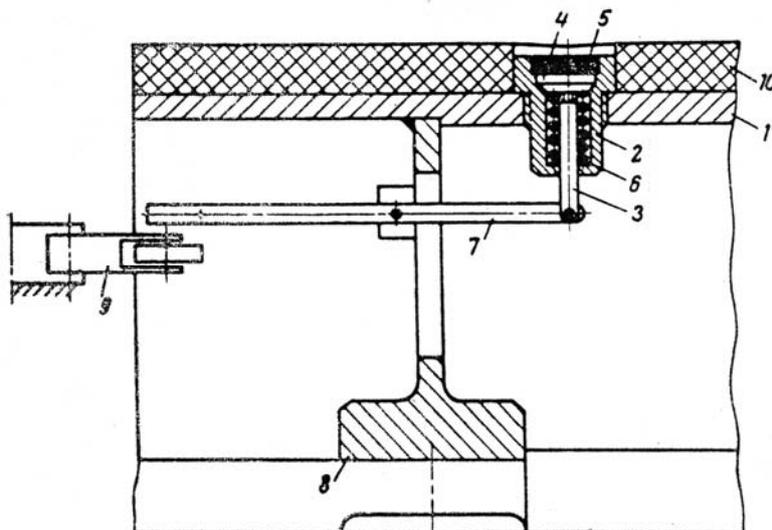


Рис. 4.9. Устройство для предупреждения скольжения конвейерной ленты.

В обечайку 1 приводного барабана ввёрнут патрон 2, в котором находится палец 3 со съёмной головкой 4, залитым легкоплавным сплавом 5 с температурой плавления $90-100\text{ C}^{\circ}$, и пружина 6. Палец 3 шарнирно соединён с двуплечим рычагом 7, укреплённым на ступице 8 приводного барабана. Рычаг конечного включателя 9, укреплённого на раме приводной головки конвейера, расположен ближе к центру барабана, чем двуплечий рычаг 7.

При пробуксовке барабана футеровка 10 нагревается и при достижении определённой температуры сплав 5 в патроне 2 расплавляется и выжимается

наружу головкой 4 под воздействием пружины 6. При этом происходит поворот двухплечего рычага 7, который взаимодействуя с концевым выключателем 9, останавливает конвейер.

Для установки тепловой защиты в исходное положение после срабатывания палец 3 с рычагом 7 разъединяются, а патрон совместно с деталями, заменяется запасным патроном с заранее залитым сплавом.

Для упрощения устройства предлагается термодатчик, выполненный в виде биметаллической пластины с отогнутым свободным концом (рис 4.10).

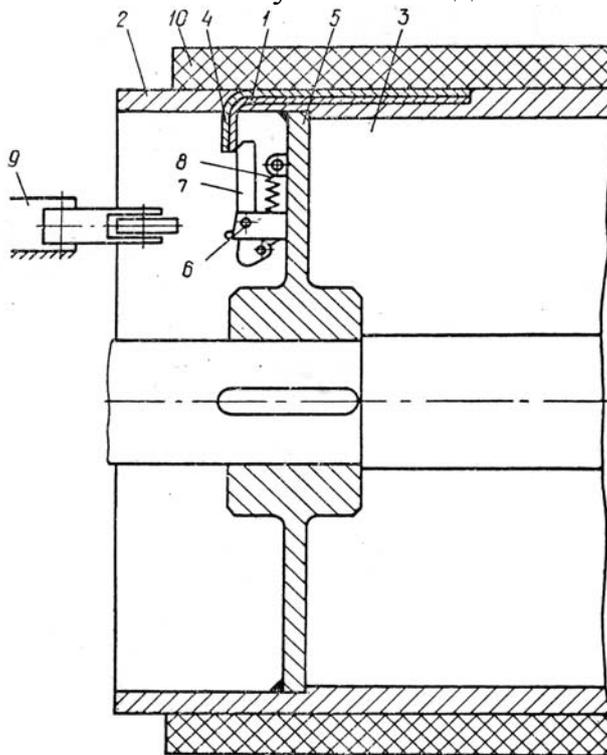


Рис. 4.10. Схема установки термодатчика

Устройство содержит биметаллическую пластину 1, установленную на обечайке 2 барабана 3 и снабженную отогнутым концом 4. На ступице 5 барабана 3 на оси 6 находится рычаг 7 с пружинной 8, которая стремится его повернуть в горизонтальное положение.

На неподвижной части рамы конвейера установлен концевой выключатель 9 привода. В нормальном положении рычаг 7 удерживается отогнутым концом 4 пластины 1.

При пробуксовке ленты на футеровке 10 обечайки 2 барабана 3 нагреваются вместе с пластиной 1. За счёт разности коэффициентов теплового расширения металлов из которых состоит пластина 1, её свободный конец 4 разгибается наружу, и освобождает рычаг 7. Последний, под действием пружины 8 поворачивается в горизонтальное положение и воздействует на выключатель 9, который выключает привод конвейера.

Для повышения надёжности устройства предлагается конструкция тепловой защиты когда количество подвижных частей сведено к минимуму (рис. 4.11).

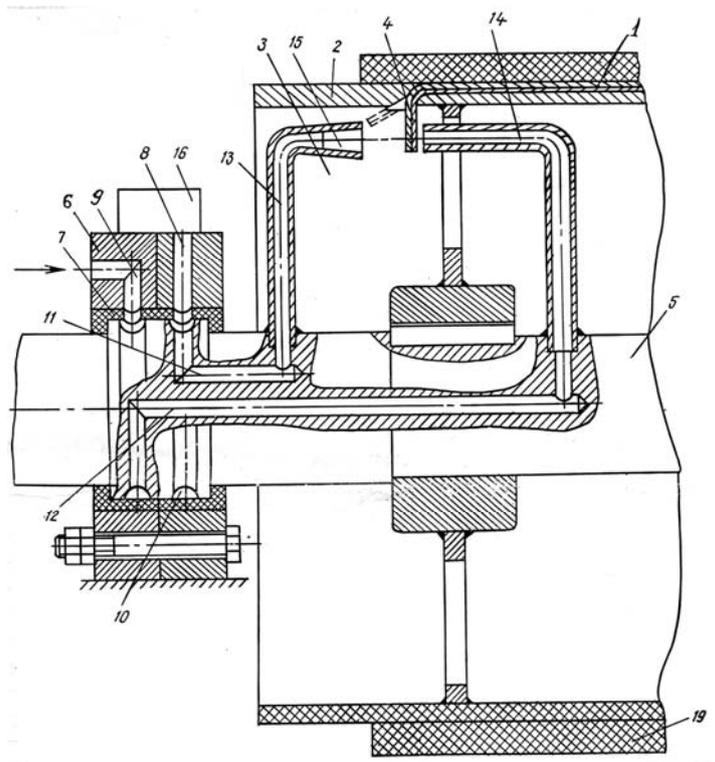


Рис. 4.11. Конструкция тепловой защиты с повышенной надёжностью

Устройство содержит биметаллическую пластину 1 установленную на обечайке 2 барабана 3 и снабженную отогнутым концом 4. На валу 5 барабана установлен коллектор, состоящий из неподвижного корпуса 6, выполненного для удобства сборки из двух половин, куда запрессован подшипник скольжения 7. Воздушные каналы 8 и 9 через кольцевые каналы 10 на валу барабана сообщаются соответственно с осевыми каналами 11 и 12, имеющие выход наружу через трубопроводы 13 и 14 соответственно. Трубопровод 13 имеет расширяющийся конус 15 на входе. К корпусу прикреплен пневматический преобразователь 16. Его основной частью является тонкая проволока 17 которая включена в одну из плеч мостовой схемы и усилитель.

При пробуксовке ленты на футеровке 19 закреплённой на обечайке 2 последняя нагревается вместе с пластиной 1, свободный конец 4 которой отгибается наружу и пропускает струю воздуха нагнетаемую в канал 9 и проходящую через кольцевой канал 10 в осевой канал 12 и трубопровод 14, который в нормальном положении перекрывается свободным концом 4 биметаллической пластины 1.

При отгибании конца 4 воздух проходит в конус 15 и через трубопровод 13, осевой канал 11, кольцевой канал 10 и выходной канал 8 попадает в пневмоэлектрический преобразователь 16, проволока 17 которого охлаждается потоком воздуха. При охлаждении проволока меняет своё сопротивление, происходит разбаланс моста и появление электрического сигнала на входе усилителя 18, который даёт сигнал на отключение конвейера. В качестве источника движения струи может быть использован сжатый воздух.

Для упрощения конструкции и увеличения надежности тепловой защиты предлагается датчик выполненный в виде замкнутой полости, заполненной водой и связанной каналами с исполнительным механизмом (рис. 4.12).

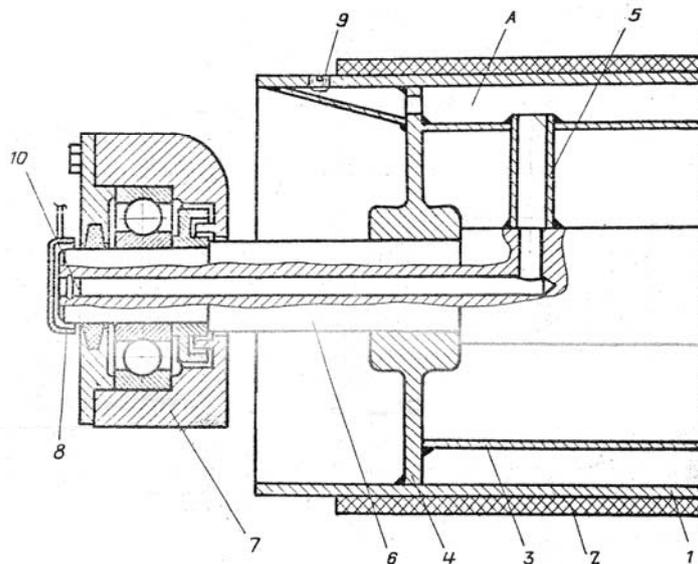


Рис. 4.12. Температурный датчик выполненный в виде замкнутой полости

Обечайка 1 приводного барабана охватывается футеровкой 2. Внутренняя обечайка 3 и диска 4 создаёт замкнутую полость «А», заполненную водой, которая трубкой 5 соединяется с каналом вала 6, установленного в подшипниковых опорах 7. Рядом с торцом вала установлен отбойник 8, связанный с конечным выключателем. Вода заливается в отверстие закрываемое пробкой 9, а внутренний канал вала закрыт эластичной пробкой 10, рассчитанной на воздействие определённой величины давления.

При пробуксовке ленты футеровка нагревается и передаёт тепло обечайке, в следствие чего температура залитой воды в полость «А» повышается и вода начинает превращаться в пар.

При этом повышается давление пара, который выталкивает пробку 10 и воздействует на отбойник 8 связанный с конечным выключателем привода конвейера.

Основные результаты выполненных исследований и приведенных в настоящей главе сводятся к следующему:

- на основании проведенных исследований разработана методика расчёта, позволяющая определять количество воздуха, эжектируемого горной массой в аспирационное укрытие с учетом процесса взаимодействия горной массы с воздухом, а также аэродинамических свойств технологического оборудования, создающих избыточное давление в укрытиях, который позволит существенно повысить эффективность работы аспирационного укрытия и снизить запыленность воздуха в конвейерных выработках;

- разработан способ предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве, отличающийся тем, что с целью исключения процесса оседания

пыли за счет повышенного давления воздуха, подконвейерное пространство по его длине снабжено трубопроводом с равномерной раздачей воздуха вдоль пути;

- предложены технические решения по защите конвейерного транспорта от аварий с целью повышения уровня их безопасности, основанные использовании термодатчиков выполненных из легкоплавных материалов и биметаллических пластин, а также в виде полостей заполненных водой, которые при срабатывании от воздействия температуры, выключают конвейер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приведено решение актуальной научной задачи повышения уровня пылевзрывобезопасности в конвейерных выработках угольных шахт, которое заключается в установлении закономерностей процесса образования, распространения и отложения пыли, позволяющих прогнозировать динамику выноса и осаждения угольной пыли в конвейерной выработке с учетом влияния подконвейерного пространства и разработке на их основе способов и средств повышения уровня пылевзрывобезопасности горных выработок оборудованных конвейерным транспортом.

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Установлено, что при распространении аэрозолей в конвейерных выработках, изменения его дисперсного состава не приводят к изменению закона распределения. Угол наклона прямой, характеризующей распределение в двойной логарифмической сетке, остается постоянным, а изменяется только начальное смещение прямой.

2. Показано, что влияние зоны подконвейерного пространства на уровень пылевзрывобезопасности конвейерной выработки обусловлено его изолированностью от общего пространства выработки и выполнением функции проводника взрывного горения в аварийной ситуации, что снижает эффективность противопылевых мероприятий и требует дополнительных способов и технических средств предупреждающих отложение пыли в подконвейерном пространстве.

3. На основании теоретического анализа процессов образования аэрозолей при разрушении горных пород, выполненного с учетом вероятностного характера разрушения и шероховатости трущихся поверхностей, получено математическое описание функций распределения. Сопоставление полученных выражений с существующими эмпирическими функциями показывает, что они совпадают с распределением Розина-Раммлера при значении показателей степени равным двум.

4. Получены выражения учитывающие явление гравитационного и инерционного осаждения частиц, позволяющие рассчитать концентрацию и дисперсный состав рудничных аэрозолей по длине и высоте конвейерных выработок.

5. Получена математическая модель изменения концентрации пыли по длине выработки при наличии в ней конвейера, которая описывается зависимостью близкой к экспоненте с асимптотой, параметры которой зависят от содержания пыли в вентиляционном потоке выходящего из очистного забоя, выделения пыли из конвейера, параметров пыли, аэродинамической характеристики выработок и скорости воздушной струи.

6. Установлено, что на интенсивность пылеобразования и фоновую концентрацию в конвейерной выработке оказывает существенное влияние производительность конвейера и параметры проветривания. Результаты исследований свидетельствуют об увеличении интенсивности пылевыведений от работающего конвейера при увеличении скорости вентиляционного потока и производи-

тельности конвейера. Полученные экспериментальные точки образуют линии с наклоном к оси абсцисс, что подтверждает справедливость утверждений и исследования выполненные ранее.

7. Выявлено, что концентрация пыли в выработках, несмотря на наличие в них распределенного по длине источника пылеобразования, стабилизируется на определенном уровне и практически не зависит от длины выработки. Это явление объясняется оседанием части пыли образованной рассредоточенным по длине выработки источником пылеобразования.

8. Теоретически и экспериментально показано, что полученные зависимости позволяют более точно описать изменение концентрации по длине выработки при одновременном воздействии точечного и распределенного источников пылеобразования в горной выработке.

9. Разработана методика расчёта, позволяющая определять количество воздуха, эжектируемого горной массой в аспирационное укрытие с учетом процесса взаимодействия горной массы с воздухом, а также аэродинамических свойств технологического оборудования, создающих избыточное давление в укрытиях, который позволит существенно повысить эффективность работы аспирационного укрытия и снизить запыленность воздуха в конвейерных выработках.

10. Предложен способ предупреждения пылеотложений в подконвейерном пространстве, отличающийся тем, что с целью исключения процесса оседания пыли за счет повышенного давления воздуха, подконвейерное пространство по его длине снабжено трубопроводом с равномерной раздачей воздуха вдоль пути.

11. Предложены технические решения по защите конвейерного транспорта от аварий с целью повышения уровня их безопасности, основанные использовании термодатчиков выполненных из легкоплавных материалов и биметаллических пластин, а также в виде полостей заполненных водой, которые при срабатывании от воздействия температуры, выключают конвейер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Новикова Е.А. Изменение концентрации и дисперсного состава пыли по длине конвейерных выработок угольных шахт // Збірник наукових праць ДДТУ. – Дніпродзержинськ: – 2010. Випуск 2 (15). – С. 319 – 327.
2. Новикова Е.А., Лебедев Я.Я., Клочков В.Г. Обоснование параметров аспирационного укрытия узла перегрузки ленточного конвейера // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: – 2011. – № 1. – С. 81 – 84.
3. Кузьминов К.В., Лебедев Я.Я., Новикова Е.А. Тепловая защита приводного барабана ленточного конвейера // Науковий вісник НГУ. – 2009. №11. – С. 52 – 55.
4. Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Новикова Е.А. Анализ процесса пылеобразования при добыче и транспортировке полезных ископаемых. // Материалы Международной научно–практической конференции «Школа подземной разработки». – 2010. – С. 126 – 135.
5. Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Новикова Е.А. Определение концентрации пыли с учётом дисперсности частиц, образовавшихся при добыче и транспортировке угля. // Материалы Международной конференции «Форум Горняков». – 2010. – С. 208 – 218.
6. Лебедев Я.Я., Новикова Е.А., Яворская Е.А. Исследование интенсивности накопления мелких фракций угля в пространстве под конвейером // Материалы Международной научно-практической конференции «Школа подземной разработки». – 2011. – С. 251 – 257.
7. Новикова Е.А. Интенсивность накопления частиц угля в подконвейерном пространстве и влияние их на запыленность воздуха. / Новикова Е.А., Лебедев Я.Я. // Материалы науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых НГУ «Наукова весна – 2011» – Д.: Национальний горний університет, 2011. – С. 157–158.
8. Новикова Е.А. Динамика рудничных аэрозолей, образовавшихся при добыче и транспортировке полезных ископаемых / Новикова Е.А. // Збірник наукових праць НГУ. – 2010. – № 35, том 1. – С. 167–177.
9. Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2010 год // Материалы ЦШ ГВГСС. – Донецк, 2011. – 135 с.
10. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей / В.И. Мамаев, Ж.А. Ибраев, В.А. Лигай и др. – М.: Недра, 1990. – 159 с.
11. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
12. Лудзин В.С. Пожары на конвейерном транспорте // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – №1. – С. 41–43.
13. Юрченко В.М. Анализ причин возникновения пожаров на шахтных ленточных конвейерах // Горные машины и автоматика. – 2003. №1.

14. Захист населення і території України від надзвичайних ситуацій. Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків чорнобильської катастрофи. Річна доповідь за 1997 рік. Київ. – 1998. – 112 с.
15. Телятников С.А., Шевцов Н.Р. Автоматическая взрывозащита конвейерных выработок при авариях, связанных с воспламенениями метана и угольной пыли. Сборник научных трудов.- Донецк: «Норд- пресс», 2005.-с. 90–91.
16. Хачатрян С.А. Проблемы надежности конвейерного транспорта угольных шахт. – СПб, 2004. – 182 с.
17. Полуниин В.Т., Гуленко Г.Н. Эксплуатация мощных конвейеров. – М.: Недра, 1986. – 344 с.
18. Нецепляев В.И., Петрухин П.М. Борьба с пылом у выработках з конвейерною доставкою вугілля. – К.: Техніка, 1972. – 128 с.
19. Левин М.М. Борьба с пылеобразованием на конвейерных уклонах. - М.: Углетехиздат, 1949. – 19 с.
20. Про затвердження Програми підвищення безпеки праці на вугледобувних та шахтобудівних підприємствах на 2011 – 2015 рр // Постанова КМУ від 6 липня 2002 р. № 939. – Київ, 2002.
21. Правила безпеки у вугільних шахтах. ДНАОП 10.0 - 1.01 - 10. – К.: Держгірпромнагляд України, 2010. – 432 с.
22. Збірник інструкцій до Правил безпеки у вугільних шахтах. Керівний нормативний документ: – Т. 1. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 480 с. (Укр. та рос. частини); – Т. 2. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 416 с.
23. Мясников А.А., Старков С.П., Чикунев В.И. Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах. – М.: Недра, 1985. – 205 с.
24. Нецепляев В.И., Петрухин П.М., Кравец В.М. Гидрозащита от взрывов угольной пыли в шахтах. – К.: Техніка, 1980. – 131 с.
25. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М.Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев и др. – М.:Недра. – 1981. – 271 с.
26. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах / П.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качан, В.С. Сергеев. – М.: Недра, 1974. – 304 с.
27. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И.Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
28. Журавлев В.П., Вайсенберг И.В., Демишева Е.Ф. Борьба с распространением и взметыванием пыли в горных выработках. Экспресс-информация, ЦОП КазНИИНТИ, 1981. – 172 с.
29. Журавлев В.П., Демишева Е.Ф. Спирин Л.А. Аэродинамические методы борьбы с угольной пылью. – Издательство Ростовского университета, 1988. – 144 с.
30. Борьба с пылью в очистных забоях / Г.С. Гродель, Ю.Н.Губский и др. – К.: Техніка, 1983. – 71 с.
31. Руденко К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание и пылеулавливание. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Недра, 1981. – 350с.

32. Ксенофонтова А.И., Бурчаков А.С. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах. – М.: Недра, 1965. – 231 с.
33. Кириин Б.Ф. Проблемы борьбы с шахтной пылью // Уголь. – 1999. – № 1.
34. Гродель Г.С., Яремаченко П.П. Внутрисменная динамика запыленности в очистных и подготовительных забоях угольных шахт и связь между отдельными показателями концентрации пыли. Борьба с силикозом. Т. 11., М.: Наука, 1982. – С. 80 – 83.
35. Голинько В.И. Рудничная пыль, динамика, контроль концентрации и пылеотложений // Уголь Украины – 1994. – №4 – С. 58–59.
36. Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Киреев А.М.. Интенсивность пылеотложения и нижние пределы взрывчатости угольной пыли как показатели пылевзрывоопасности горных выработок. // Современные способы борьбы с пылью. Донецк: ЦБТИ МУП УССР – МакНИИ, 1967. – 116 с. – с. 57–60.
37. Голинько В.И., Кузьминов К.В., Колесник В.Е. Исследование динамики запыленности воздуха в выемочных штреках марганцевых шахт // Науковий вісник НГА України. – 2006. – № 2. – С. 15–20.
38. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. – Москва-Ленинград, 1951. – 490 с.
39. Голинько В.И., Колесник В.Е. Контроль пылеотложения в горной выработке по содержанию пыли в воздухе с учетом закономерности ее оседания // Горный информационно–аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2002. – Вып. № 1. – С. 194–198.
40. Баренблатт Г. И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке. ПММ, т.-XVII, вып. 3, 1953. С. 53–61.
41. Бекирбаев Д. Б., Гродель Г. С. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. М., 1959. – 499 с.
42. Чуркин В. К., Гендельмен Я. М. К вопросу об определении скорости падения частиц в воздушной среде // Разработка месторождений полезных ископаемых. М., 1975. Вып. 39.
43. Певнев О. С, Певнев А. О. Измерение распределения угольной пыли в криволинейном воздушном потоке методом фотографического фотометрирования // Обогащение неметаллических полезных ископаемых. Свердловск, 1974. Вып. 1.
44. Старков С. П. Способ моделирования газовых потоков, транспортирующих твердые частицы, и его применение / Труды ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности. 1974. № 21. 245 с.
45. Фролов М. А., Бородай В. И. Некоторые вопросы теории и практики моделирования потоков запыленного воздуха в очистных забоях угольных шахт // Борьба с силикозом. М., 1970. 314 с.
46. Милетич А.Ф., Кузьминов К.В., Колесник И.Я., Логвинов В.П.. Некоторые закономерности динамики запыленности в выработках с конвейерной доставкой марганцевых руд. //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1976. – № 4. – С. 59–60.

47. Walli R. T. Fine partice dunamics and dust control. – Canadian Mining Jurnal, 1964, №10, p. 75 – 77.
48. Dust Suppression in Coal Mines. – Mining magazine, 1965, vol 112, №3, p. 191 – 193.
49. Справочник по рудничной вентиляции. М., 1977. 328 с.
50. Чемезов К. П., Муксуков И. Х., Девиденко Г. П. Образование и подавление пыли на шахтах северо-востока СССР. Новосибирск, 1977. 246 с.
51. Шпонин А. Н., Козлов А. К. Оценка пылевого фактора при струговом и комбайновом способах выемки угля на шахтах комбината «Ростовуголь» // Гигиенические аспекты охраны здоровья населения. М., 1977. 312 с.
52. Байков А. Ф. Исследование процесса распространения пыли в турбулентных потоках очистных выработок при струговой выемке угля // Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных шахт с вычислительно-логическим управлением. М., 1975. 249с.
53. Лихачев Л. Я. и др. Способы борьбы с пылью в шахтах при работе выемочных комбайнов. Кемерово, 1970. 100 с.
54. Усков В. И., Емелина Л. А. Исследования процесса распространения пыли в механизированном забое // Труды ИГД им. А. А. Скочинского. 1974. Вып. 115.
55. Хохлов П. А. Перенос пыли воздушным потоком при работе выемочных комбайнов // Вентиляция шахт и рудников. 1977. Вып. 4.
56. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. – М: Недра, 1978. – 440 с.
57. Система локализации взрывов автоматическая СЛВА.0. Руководство по эксплуатации. 1811.00.00.000 РЭ. – Конотоп. 1999. – 23 с.
58. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 352 с.
59. Рид Р., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов. – М.: Гостоптехиздат, 1964. – 334 с.
60. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
61. Янов А.П., Ващенко В.С. Защита рудничной атмосферы от загрязнения. - М.: Недра, 1977. – 263 с.
62. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Б.Д. Бекирбаев, Г.С. Гродель, П.М. Петрухин и др. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 198 с.
63. Смачивание пыли и контроль запыленности в шахтах / В.В. Кудряшов, Л.Л. Воронина, М.К. Шуринова и др. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
64. Кудряшов В.В., Химченко В.Ф. Свойства рудничной пыли и радиоизотопный метод определения запыленности воздуха // Колыма, 1969. – № 6. – С. 31 – 33.
65. Онтин Е.И., Кустов И.И. Исследование дисперсного состава пыли угольных шахт // Совершенствование вентиляции и способов борьбы с пылью и газом в угольных шахтах. Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, вып. 171. – М.: 1978. – С. 53–61.

66. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – изд. 2-е, испр. – Ленинград: Химия, 1974. – 280 с.
67. Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Киреев А.М. Предупреждение взрывов угольной пыли в конвейерных выработках. // Современные способы борьбы с пылью. Донецк: ЦБТИ МУП УССР – МакНИИ, 1967. – С. 60 – 62.
68. Chandan I. S., Singhal R. K. Dust Suppression in Mines. – Colliery Guardian, 1965, vol 210, №5413, p. 91 – 95.
69. Качан В.Н., Саранчук В.И., Данилов А.Т. Предупреждение взрывов угольной пыли в глубоких шахтах. – К.: Техника, 1990. – 120 с.
70. Стуканов В.И., Иванов В.Н., Логинов С.М. Очистка рудничного воздуха от пыли при конвейерной доставке руды. // Вентиляция шахт и рудников. – Л.: 1983. – Вып.10. – С. 84 – 87.
71. Медведев Э.Н., Кашуба О.И. Научные основы гидрообеспыливания в угольных шахтах // Сборник научных трудов НГАУ. – Днепропетровск: – 1999. – № 5. – С. 38 – 42.
72. Патент 2187653 Российской Федерации, МПК E21F13/08. Способ транспортирования угля в шахте / Е.В. Игнатов, И.Е. Игнатов. Дата подачи 05.03.2001. Оpubл. 20.08.2002, Бюл. № 3. – 44 с.
73. Патент ФРГ № 1120979, кл. 81 e 13, опублик. 1962.
74. Дмитриев А. П. и др. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М, «Недра», 1978, с. 281–282.
75. Авторское свидетельство СССР № 385856, кл. В 65 G 45/00, 17.05.71.
76. АС № 861221 СССР, кл. В 65 G 45/00 Устройство для очистки подконвейерного пространства / Р. Ю. Подерни, М.Х. Мухаммедов, В.Ф. Сандалов, М.Э. Гутерман, М.Р. Хромой (СССР) . – № 2882813/27-03; Заявлено 12.10.79; Оpubл. 07.09.81. Бюл. № 33. – 3 с.
77. АС № 757420 СССР, кл. В 65 G 45/00 E21 F5/00 Устройство для уборки пыли и просыпи / Т.И. Пияшова, В.И. Арсенов (СССР). – № 2555530/22-03; Заявлено 19.12.77; Оpubл. 23.08.80. Бюл. № 31. – 4 с.
78. Дьяков В.В. Обеспыливающее проветривание шахт // Проблемы современной рудничной аэрологии. – М.: Наука, 1974. – С. 179 – 186.
79. Бурчаков А.С, Москаленко О.М. Динамика аэрозолей в горных выработках. - М.: Наука, 1965. – 68 с.
80. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М., Наука, 1980. – 176 с.
81. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1967. – 260 с.
82. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
83. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. – М.: Metallургия, 1988. – 256 с.
84. Гордон Г.М., Аладжалов И.А. Газоочистка рукавными фильтрами в цветной металлургии. – М.: Государственное НТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1956. – 215 с.

85. Борьба с угольной пылью в шахтах / Е.Л.Бекирбаев, Г.С.Гродель и др. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 287 с.
86. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М.Петрухин, Г.С.Гродель и др. – М., Недра, 1981. – 248 с.
87. Кудряшов В.В. Исследование дисперсного состава угольной пыли // Безопасность труда в горной промышленности, 1967. – № 12. 112 с.
88. Голузин Н.И. Изменение концентрации фракций пыли в зависимости от скорости воздуха в лаве // Известия вузов. Горный журнал, 1962. – № 2.
89. Голузин Н.И., Ярцев В.А. Оценка дисперсности рудничной пыли Челябинского бурого угля по весовым показателям // Известия вузов. Горный журнал, 1962. – № 3.
90. Бройер Г. Совершенствование методов замера пыли в производственных условиях // Глюкауф, 1961. - № 21. С. 17–22.
91. Никитин В.С., Левинский О.Б., Суслов Н.В. Обеспыливание атмосферы карьеров. – Ташкент, Фан, 1974. – 158 с.
92. Ткаченко С.Н. Учет влияния взметывающейся пыли на общую динамику запыленности горной выработки // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Україна наукова 2003”. том 27: Гірнична справа. – Дніпропетровськ – Кривий Ріг: “Наука і освіта”, 2003. С.32-33.
93. Колесник В.Е. Моделирование процесса распространения пыли по длине горной выработки при постоянно действующем источнике // Науковий вісник НГА України. – 2001. – № 2. – С 49–52.
94. Ярембаш И.Ф., Цапов Г.И. О закономерностях пыленакопления в каналах вентиляторов главного проветривания. // Разработка месторождений полезных ископаемых. – К.: Техника, 1984. – с.74 – 76.
95. Голинько В.И., Колесник В.Е. Оценка взрывобезопасности выработок по содержанию пыли в воздухе. // Уголь Украины, июнь, 2001. – с.24 – 27.
96. Радченко Г.А. Обеспыливающее проветривание подземных выработок. – Алма-Ата: Наука, 1970. – 200 с.
97. Кирич Б.Ф., Журавлев В.П., Рыжих Л.И. Борьба с пылевыделением в шахтах. – М.: Недра, 1983. – 213 с.
98. Ткаченко С.Н. Пылеотложение в угольной шахте // Науковий вісник НГАУ. – Днепропетровск, 2001, №1. – с. 98 -100.
99. Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. и др. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
100. Яремченко П.П. О местах, продолжительности и периодичности измерения запыленности воздуха. // Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 88-91.
101. Поздняков Г.А. Аэродинамика перехода пыли во взвешенное состояние // Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 88–91.
102. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 651 с.

103. Новикова Е.А. Динамика рудничных аэрозолей, образовавшихся при добыче и транспортировке полезных ископаемых // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: – 2010. – № 35. – Т.1.С. 167–177.
104. Карпов А.М., Возиянов А.Ф., Лепихов А.Г. Гомотропальное проветривание при разработке крутых пластов Донбасса. – В сб.: Вопросы проветривания шахт Донецкого бассейна. М.: Недра, 1969, №44, с. 25–30.
105. Дьяков В.В., Ковалев В.И. Противопылевые вентиляционные режимы на рудниках. – М: Недра, 1984. – 200 с.
106. Глузберг В. Е., Демишева Е. Ф. К вопросу о механизме и закономерностях процесса распространения и осаждения пыли в горных выработках // Вопросы теоретической и экспериментальной физики. Караганда, 1977. 119 с.
107. Петров Г.А. Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути. – М.: Стройиздат, 1951. – 214 с.
108. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы / Г. А. Петров. – Харьков : Изд. Харьк. ун-та, 1964. – 223 с.
109. Мещерский И.В. Работы по механике тел переменной массы. –М.: Рос.изд. техн.-теорет.лит., 1952. – 286 с.
110. Петров Г.А. О расчете трубопроводов для случая движения с непрерывным отделением расхода вдоль пути / Труды ХИСИ. – Харьков, 1948. Т.1. – С. 12-18.
111. Коновалов И.М. Уравнение движения жидкости переменной массы. – Труды ЛИИВТа – 1937. – С. 74– 83.
112. Костин В.Н., Блохина Л.П. Экспериментальное изучение аэродинамических параметров перфорированных металлических труб // Науч. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. –М., 1976. – Вып.142. – С. 27 – 31.
113. Квинтрадзе Ш.Н. Одномерное движение несжимаемой жидкости в перфорированной цилиндрической трубе. – Сообщение АН ГССР, 1965. – Вып. 2, т. 39. – 32 с.
114. Шепелев И.А. Воздушные завесы для борьбы с газами. // Отопление и вентиляция. — М.: Госгортехиздат, 1938. – Вып. 2. – С. 36–45.
115. Данилов М.П. Струйно–активирующие системы вентиляции, теплоутилизации и очистки воздуха (для предприятий топливно–ядерного цикла) – Днепропетровск: РИО ПГАСА, 2001. – 252 с.
116. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй.–М.: Наука,1984.–716 с.
117. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли / В.И. Саранчук, В.Н. Качан, В.В. Рекун и др. Киев: Наук. думка, 1984. – 216 с.
118. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
119. Буянов А.Д., Павленко А.Т. Обеспыливание пылящей массы при грузозачно-погрузочных работах // Вісник КТУ. – Кривий Ріг: – 2009. – № 23. – С. 232 – 234.
120. Временное руководство по применению средств борьбы с пылью на углеобогатительных фабриках и сортировках шахт. – М.: Недра, 1971. – 104 с.

121. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности / под ред. А.С. Кузьмича – М.: Недра, 1982. – 240 с.

122. Обеспыливание воздуха на фабриках горнообогатительных комбинатов / И.И. Афанасьев, В.С. Ващенко, Г.С. Генералов и др. – М.: Недра, 1972. – 184 с.

123. Баланин В.А., Переверзев О.В. Распределение теплоты между трущимися телами // Трение и износ. – 1992. №3, т. 13. – С. 507–516.

Наукове видання

Новікова Олена Олександрівна

**ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ
В ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

Монографія
(Російською мовою)

Видано в авторській редакції

Підп. до друку 02.07.2013. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 5,5.
Обл.-вид. арк. 5,5. Тираж 40 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ "Національний гірничий університет".
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.