

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ПЕРНЕБЕК Бектур Пернебекулы

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ
ФРАКЦИЙ В ПЫЛЕВОМ АЭРОЗОЛЕ ГОРНО-
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Скопинцева Ольга Васильевна**

Москва 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Увеличение объемов производства кокса сопровождается интенсификацией работ в углеподготовительных цехах металлургических заводов при выполнении производственных операций по приему, разгрузке, складированию и транспортированию углей, дозированию, дроблению, сепарации и смешению компонентов шихты. Уровни запыленности воздуха в помещениях угольных терминалов могут составлять от 38 до 768 мг/м³. Рост интенсификации и концентрации углеподготовительных работ сопровождается увеличением запыленности воздуха, в том числе повышением содержания тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле, обуславливающих возникновение заболеваний пылевой этиологии. По статистическим данным за период с 2020 по 2025 годы ежегодно выявлялось от 6 до 8 тысяч новых случаев профессиональных заболеваний.

Запыленность воздуха угольной пылью в производственных цехах металлургической отрасли является важной проблемой, так как она может оказывать негативное влияние на здоровье работников, а также на производственные процессы и окружающую среду. Угольная пыль образуется не только в процессе транспортировки и приема угля, но также в доменном, мартеновском, литейном производствах, в цветной металлургии при использовании угля в металлургических печах.

По данным Роспотребнадзора и ФНЦ гигиены и охраны здоровья (ФНЦГР им. Н.Ф. Измерова), заболевания, вызванные промышленными аэрозолями, включая пневмокониозы, пылевые бронхиты, составляют: около 40–45% всех впервые выявленных профессиональных заболеваний в стране. Эта группа стабильно удерживает 1-е место в профессиональной заболеваемости уже на протяжении многих лет.

В металлургической отрасли заболевания пылевой этиологии относятся к числу наиболее распространенных. Преобладающими формами профессиональных заболеваний являются хронический пылевой бронхит, пневмокониоз (силикоз), хронический обструктивный (астматический) бронхит и др.

Цель работы состоит в улучшении условий труда работников углеподготовительных цехов горно-металлургических предприятий по

пылевому фактору за счет целенаправленного уменьшения доли тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле.

Идея работы заключается в возможности снижения концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле за счет усиления диффузионного механизма захвата пылевых частиц каплями жидкости с применением раствора смачивателя оптимальной концентрации, усиливающей адгезионное закрепление, уменьшающей поверхностное натяжение жидкости и повышающей смачиваемость угольной пыли.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

1. Повышение эффективности пылеподавления, в том числе тонкодисперсных частиц угольной пыли, обеспечивается использованием раствора смачивателя, оптимальная концентрация которого определяется с учетом элементного состава органической массы угля, степени его метаморфизма, зольности, выхода летучих веществ.

2. При седиментационном пылеулавливании частиц угольной пыли в диапазоне от 1 до 250 мкм применение раствора смачивателя с концентрацией 0,1% приводит к снижению времени седиментации респирабельной и торакальной фракций пыли - до 2,4 раз, грубой - до 3,4 раз (по сравнению с концентрацией 0,05%), что повышает эффективность связывания и осаждения тонкодисперсных фракций угольной пыли в зоне работы вагоноопрокидывателя.

3. Захват частиц пыли каплями воды зависит от соотношения размеров частиц пыли и капель жидкости. При фиксированном диаметре капли для тонкодисперсных фракций пыли увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата до 4,2 раз, что объясняется увеличением числа Стокса и усилением инерционного механизма улавливания. Для частиц пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра частиц пыли к диаметру капель не должно превышать 2, для частиц пыли диаметром 10 мкм - 4÷5 раз. Применение смачивателя увеличивает диапазон эффективности соотношения размеров частиц пыли и капель жидкости до 20 раз.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: значительным объемом теоретических и лабораторных исследований, использованием методов теории вероятностей и математической статистики, применением апробируемых методик и

современного оборудования по электронно-сканирующей микроскопии JSM-7600F с системой микроанализа (ЭДС) производства OXFORD и программным обеспечением AZTEC, лазерной микроскопии для получения результатов исследований.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ современного состояния условий труда по пылевому фактору и профессиональной заболеваемости на металлургических предприятиях.

2. Выполнить анализ существующих методов и технических средств пылеподавления, применяемых при перегрузке сыпучих материалов, в том числе угля вагоноопрокидывателями на металлургических предприятиях, с учетом их эффективности в отношении тонкодисперсных фракций.

3. Исследовать дисперсный состав и физико-химические свойства тонкодисперсных фракций угольной пыли, образуемой в процессе работы вагоноопрокидывателей на коксохимических заводах, в зависимости от характеристик угля.

4. Установить влияние размеров частиц пыли и капель жидкости на коэффициент захвата угольной пыли каплями жидкости с учетом применения смачивателя.

5. Обосновать технические мероприятия по уменьшению доли тонкодисперсных фракций пыли в пылевом аэрозоле горно-металлургических предприятий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– установлена зависимость атомного отношения кислорода к углероду в угле от его влажности, зольности, выхода летучих веществ, марки;

– доказано, что применения 0,1% раствора смачивателя СП-01 позволяет снизить время седиментации респирабельной и торакальной фракций пыли - до 2,4 раз, грубой – до 3,4 раз (по сравнению с концентрацией 0,05%);

– установлена зависимость коэффициента захвата пылевых частиц каплями жидкости от отношения размеров частицы и капли и условий смачивания.

Научное значение работы заключается в обосновании рациональных параметров пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями, обеспечивающих наиболее значительный эффект в области минимальной

эффективности улавливания (1-3 мкм), что способствует улучшению условий труда по пылевому фактору.

Практическая значимость исследований состоит в разработке рекомендаций по определению рациональных параметров пылеподавления на угольных и коксохимических предприятиях по снижению PM_{2.5}, а также в разработке методики оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий на основе учета дисперсного состава пылевого аэрозоля с целью улучшения условий труда горнорабочих и снижения риска профессиональных заболеваний.

Реализация работы. Результаты исследований и рекомендации использованы при оценке параметров систем пылеподавления, а также оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих горно-металлургических предприятий, проводимой Автономной некоммерческой организацией дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности».

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на Межвузовском международном конгрессе «Высшая школа: научные исследования» (Москва, 4 апреля 2024 г.), на IX Международной научно-практической конференции «Современное право России: проблемы и перспективы» (Москва, 5 декабря 2024 г.), на международной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, 15 января 2025г.), на научных семинарах кафедры «Техносферная безопасность» (НИТУ МИСИС, 2020 – 2025 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей (в том числе 5 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 2 – в рецензируемых изданиях ВАК РФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения; содержит 17 таблиц, 23 рисунка, список литературы из 97 наименований и 2 приложения.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., проф. О.В. Скопинцевой, зав. кафедрой «Техносферная безопасность», д.т.н., проф. Т. И. Овчинниковой, д.т.н., доц. С.В. Баловцеву и всем сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность» за содействие при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В решении вопросов улучшения пылевой обстановки в горно-металлургической отрасли внесли значительный вклад такие учёные как: И.Д. Балон, В.Н. Воронин, В.П. Журавлев, Г.С. Забурдяев, Е.И. Кабанов, Г.И. Коршунов, А.В. Корнев, Б.Ф. Кирин, В.В. Кудряшов, А.С. Кобылкин, А. Е. Лапшин, В. И. Ляшенко, Л.Я. Лихачев, М.И. Нецепляев, Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко, В.А. Родионов, Соболев В.В., О.В. Скопинцева, Б.В. Старк, А.В. Трубицын, А.Э. Филин, Д.В. Кортней, Л. Манделл, Р. Сальман, Colinet, J.M. Listak, X. Chen, Hinds W.S., Y. Zhang, Q. Wang и др.

Большой теоретический и практический вклад в повышение безопасности труда и улучшение санитарно-гигиенических условий в горно-металлургической отрасли внесли А.А. Скочинский, А.И. Ксенофонтова, К.З. Ушаков, М.А. Сребный, А.А. Форсюк, С.В. Баловцев, О.В. Виноградова, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин, К.С. Коликов, И.Л. Кравчук, Е.Ю. Куликова, А.М. Меркулова, Т.И. Овчинникова, А.Э. Филин и др.

В условиях современного промышленного развития и наращивания производственных мощностей, особенно в таких базовых отраслях, как горная и металлургическая, статистические данные Росстата свидетельствуют о серьезности проблемы обеспечения безопасных условий труда: доля работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, достигает 37,9%. Ключевая проблема существующей системы оценки пылевой нагрузки заключается в неучёте наиболее опасных для здоровья человека компонентов производственной пыли – частиц респирабельной фракции. Эти мелкодисперсные частицы, обладающие способностью глубоко проникать в дыхательные пути и оседать в альвеолах, представляют наибольшую угрозу, провоцируя развитие профессиональных заболеваний легких, таких как пневмокониозы, хронические бронхиты и другие патологии.

Таким образом, разработка научно-обоснованных мероприятий, направленных не только на общее снижение запыленности, но и на целенаправленное уменьшение концентрации тонкодисперсных фракций в составе пылевого аэрозоля на предприятиях горно-металлургической отрасли является важной научной задачей. Для ее решения необходимо создание эффективной методики прогнозирования уровней содержания

тонкодисперсных фракций и их обязательного учета при комплексной оценке условий труда и профессиональных рисков.

По данным «Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека», заболевания, связанные с воздействием промышленных аэрозолей, с долей 15,89 % находятся на третьем месте (рис. 1).

Число лиц с двумя и более зарегистрированными профессиональными заболеваниями в целом по Российской Федерации за 2024 г. в сравнении с 2015 г. увеличилось на 13,46 % (табл. 1).

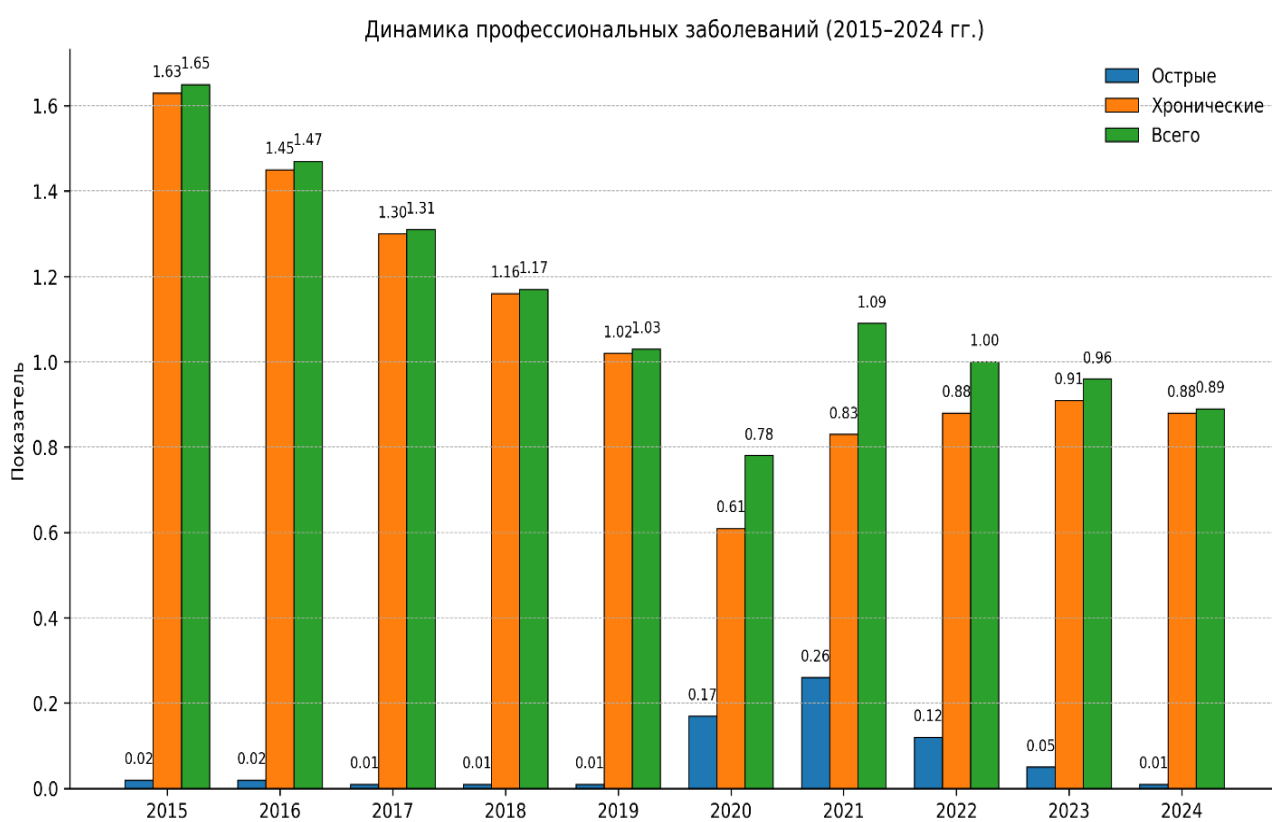


Рисунок 1 – Показатели профессиональной заболеваемости за период 2015–2024 гг. в случаях на 10 тыс. работающего населения

Таблица 1 – Структура с двумя и более зарегистрированными профессиональными заболеваниями за период 2015–2024 гг., %.

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Темп прироста к 2024 г., %

Доля лиц с двумя и более зарегистрированными профессиональными заболеваниями (отравлениями)	16,2	15,2	17,0	18,92	17,83	12,82	13,83	15,21	17,57	18,38	13,46
---	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Для эффективного предупреждения профессиональных заболеваний, связанных с пылью, необходимо осуществлять прогноз изменения этих показателей.

Угледоготовительные цеха коксохимических заводов являются местами интенсивного пылевыведения с образованием большого количества пыли. В этих цехах работает технологический персонал и ремонтные бригады по обслуживанию самого вагоноопрокидывателя, поэтому в зданиях угледоготовки возникает необходимая потребность снизить концентрацию пыли в воздухе.

Согласно литературным данным, тонкая пыль оседает на пересыпных станциях, где её мода составляет 15-17 мкм, а диапазон улавливаемых частиц — от 0,17 до 69,15 мкм, с среднеквадратическим отклонением размеров частиц 5,67 мкм. Уровни запыленности при разгрузке влажного угля с помощью вагоноопрокидывателя на предприятии АО «АрселорМиттал Темиртау» составили 40 мг/м³ и более. В экспериментальных исследованиях был проанализирован дисперсный состав пыли, образуемой во время разгрузки угля с помощью вагоноопрокидывателя (рис.2), охватывающий диапазон частиц от 0,01 до 200 мкм.

В здании вагоноопрокидывателя при разгрузке вагонов в момент опрокидывания материал высыпается в бункер на решетку под вагоном, и в этот момент вылетает большое количество пыли, которая поднимается над вагоноопрокидывателем и висит в здании вагоноопрокидывателя. Так как вагоноопрокидыватель является составной частью машин непрерывного транспорта, и он встроен в технологическую цепочку, то практически циклы опрокидывания непрерывны.

Пыль вырывается с периодичностью раз в 2–3 минуты, накапливаясь за смену и переходя на следующую смену, оставаясь в воздухе самого здания. Существующие системы аспирации, которые расположены и под бочкой вагоноопрокидывателя, и рядом, при таком объеме выбросов пыли и объеме помещения, малоэффективны. Особенно возникают большие проблемы по

пылеподавлению на нулевом уровне, где расположена сама бочка вагоноопрокидывателя.

После выгрузки вагона работают фрезерные машины, которые тоже выделяют большое количество пыли, поэтому проблема пыления присутствует и ниже нулевого уровня. Это на приемных решетках, в отделении дробления, в районе питателей, приемного стола. На этих уровнях работает система аспирации, но она не имеет большой эффективности.

На рис.2 представлен дисперсный состав пыли, отобранной с фильтров аспирационной системы здания вагоноопрокидывателя.

Анализ графических данных (рис.2) показывает, что размеры пыли, витающей в здании вагоноопрокидывателя, представлены в диапазоне частиц от 0,1 мкм до 22,5 мкм с модой 3-4 мкм. Содержание респираторной пыли размером до 7,5 мкм составляет до 95%. Таким образом, почти вся витающая пыль в здании вагоноопрокидывателя является респираторной.

Электронно-сканирующие микроскопические изображения (рис.3) отображают склонность частиц дисперсной фазы к коагуляции и их способность создавать агрегатные состояния.

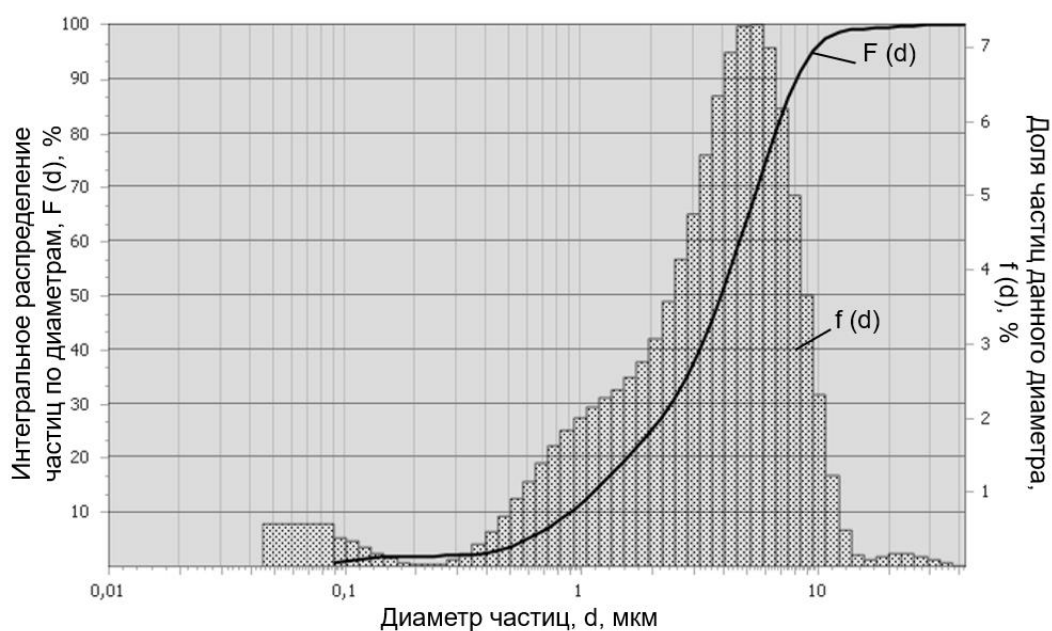


Рисунок 2 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагоноопрокидывателя

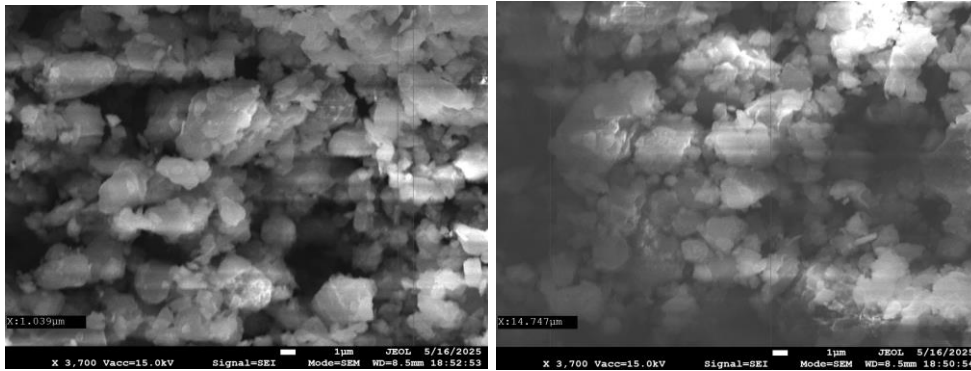


Рисунок 3 – Электронно-сканирующие микроскопические изображения высокого разрешения формы частиц пыли (размер до 10 мкм, марка Ж)

При выборе мероприятий по борьбе с пылью необходимо учитывать качественные характеристики углей (физико-химические свойства, фракционный состав, плотность, зольность и др.), которые влияют на пылевую обстановку в зонах разгрузки угля. Существенное значение при оценке свойств пыли, кроме силикозоопасности, являются также пожароопасность пыли и ее взрывчатость. Основными способами пылеподавления при ведении погрузочно-разгрузочных работ являются: орошение, увлажнение, использование пылеподавляющих добавок, вентиляция (аспирация) и другие.

Правильность выбора смачивателя для достижения оптимального результата в пылеподавлении основано на учете физико-химических характеристик угольной пыли. Были проведены лабораторные исследования смачиваемости каменного и бурого углей. Для проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности смачивания были выбраны каменные угли средней стадии метаморфизма (марки Ж, ГЖ) и бурые угли низкой стадии метаморфизма (марка ЗБВ). Характеристика исследуемых углей представлена в табл. 2.

Целью научных и экспериментальных исследований явилось выявление отличительных особенностей химического состава углей разных стадий метаморфизма и оценка влияния состава угля на смачиваемость угольной поверхности пыли (табл. 2).

Таблица 2 – Технические характеристики исследуемых образцов угольных пластов

Образцы углей	Марка угля	Влажность угля, %	Выход летучих веществ, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Теплотворная способность, кДж/кг (ккал/кг)
К1 (пласт Е-1, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,40	30,90	5,00	0,44	36317,12 (8680)

К2 (пласт Е-5, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,80	32,10	8,30	0,48	35480,32 (8480)
К3 (пласт «Поленовский», шахта им. С.М. Кирова)	ГЖ	4,00	41,70	37,80	0,30	26986,80 (6450)
К4 (пласт «Болдыревский», шахта им. С.М. Кирова)	ГЖ	4,11	41,70	29,00	0,30	26986,80 (6450)
К5 (бурый уголь), шахта «Шубарколь комир», Казахстан	ЗБВ	7,80	46,82	10,40	0,71	24175,00 (5774)
К6 (пласт 16, шахта «Алмазная»)	А	5,40	9,00	9,80	1,70	34183,28 (8170)
К7 (пласт 66, шахта «Талдинская-Западная-1»)	ДГ	9,50	38,50	13,37	0,32	31463,68 (7520)
К8 (энергетический, шахта «Грамотеинская»)	Д	7,50	43,00	10,50	0,30	31463,68 (7520)
К9 (пласт К-5, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,30	30,30	7,60	0,51	36149,76 (8640)
К10 (бурый уголь), шахта «Шубарколь комир», Казахстан	ЗБВ	7,80	46,82	10,40	0,71	24175,00 (5774)
К11 (бурый уголь), шахта «Шубарколь комир», Казахстан	ЗБВ	7,80	46,82	10,40	0,71	24175,00 (5774)

Химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается для углей различных стадий метаморфизма (табл. 3). Образцы углей низкой стадии метаморфизма имеют повышенное содержание атомов кислорода. Образцы углей высокой стадии метаморфизма содержат больше атомов углерода.

Таблица 3 – Элементный состав образцов угля

Код образца	Марка	A ^c , %	W ^p , %	П, %		Содержание элементов, % (атомное)										Атомное отношение, O/C
				От и до	max	C	O	S	Ti	Ca	Si	Al	Na	K		
К5	ЗБВ	10,4	46,8	20–30	60	74,5	25,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,340
К10	ЗБВ	9,5	45,2	20–30	60	79,6	20,4	—	—	—	—	—	—	—	—	0,260
К11	ЗБВ	9,0	44,8	20–30	60	81,7	18,1	0,1	—	—	—	—	—	—	—	0,220
К8	Д	10,5	43,0	20–25	40	82,7	17,1	—	—	—	0,1	0,1	0,1	—	—	0,210
К7	ДГ	13,37	38,5	15–20	30	85,7	14,1	0,1	—	—	0,1	0,1	—	—	—	0,160
К3	ГЖ	37,80	41,7	5–10	20	89,0	10,7	0,1	—	—	0,1	0,2	—	—	—	0,120
К4	ГЖ	29,00	41,7	5–10	20	88,5	11,4	0,1	—	—	—	0,1	—	—	—	0,130
К1	Ж	5,00	30,9	5–10	25	93,7	6,2	0,1	—	—	—	—	—	—	—	0,066
К2	Ж	8,30	32,1	5–10	25	92,7	6,1	0,2	—	—	0,6	0,4	0,1	0,1	—	0,066
К9	Ж	7,60	30,3	5–10	25	94,2	5,0	0,3	—	—	0,3	0,2	—	—	—	0,053
К6	А	9,80	9,0	5–7	40	95,3	3,7	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	—	—	—	0,039
К12	—	—	—	—	—	79,3	20,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	—	—	—	0,254
К13	—	—	—	—	—	75,8	22,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,6	Zn 0,3	Cu 0,4	—	0,294

Примечание: A^c — зольность, %; W^p — выход летучих веществ, %; П — общая пористость, %; К12, К13 — пыль (цех углеподготовки, Казахстан).

Расчетные значения коэффициента атомного отношения кислорода к углероду для проб пыли, отобранных из системы аспирации здания вагонопрокидывателя (пробы К12 и К13), показывают, что эта пыль образована из угля марки Б или Д (рис. 4).

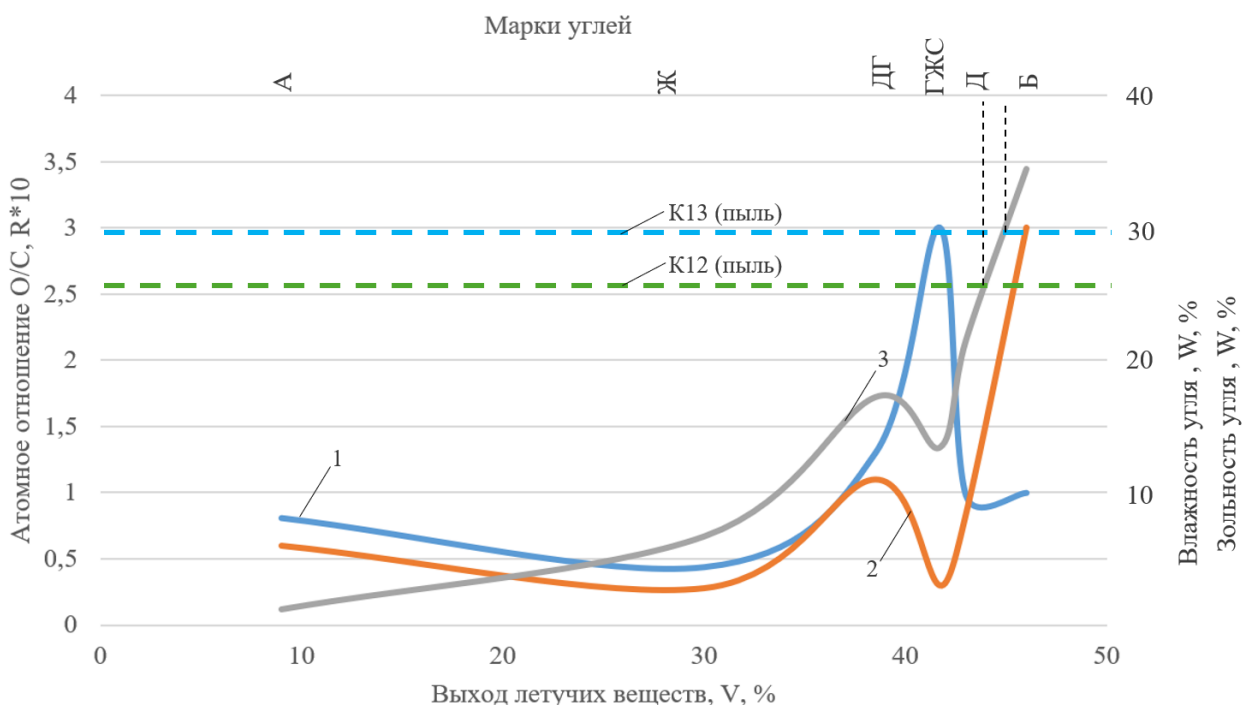


Рисунок 4 – Зависимость атомного отношения кислорода к углероду (R) от марки угля

1 - зольность угля, %; 2 - влажность угля, %; 3 - зависимость атомного отношения кислорода к углероду (R); K12 - расчетное значение атомного отношения O/C частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагонопрокидывателя (образец №1); K13 - расчетное значение атомного отношения O/C частиц пыли, улавливаемой аспирационной системой здания вагонопрокидывателя (образец №2).

Многослойная карта распределения химических элементов в угле (образец К1, марка Ж) представлена на рис. 5, из которой видно, что кислород распределен не равномерно по пылевым частицам, а сгруппирован локально в отдельных местах пробы пыли. Составы и структуры поверхностных слоев угольных частиц были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии JSM-7600F с системой микроанализа (ЭДС), производства OXFORD и программным обеспечением AZTEC.

Многослойная карта ЭДС 76

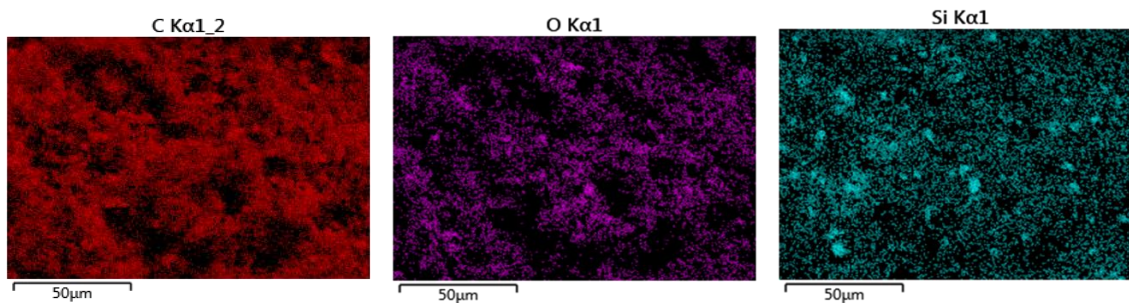
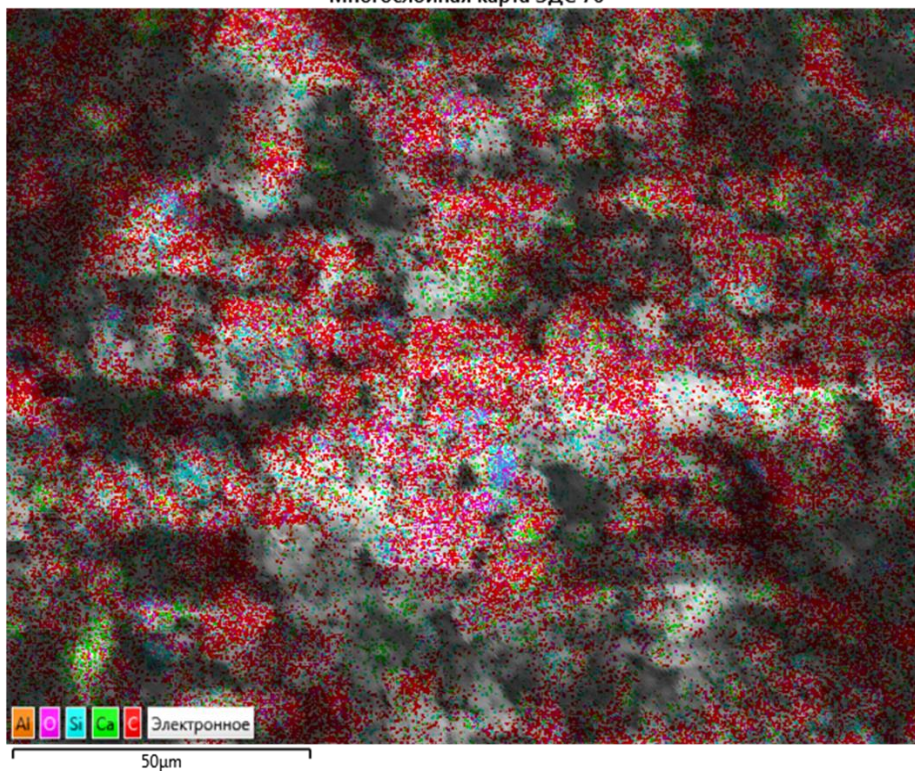
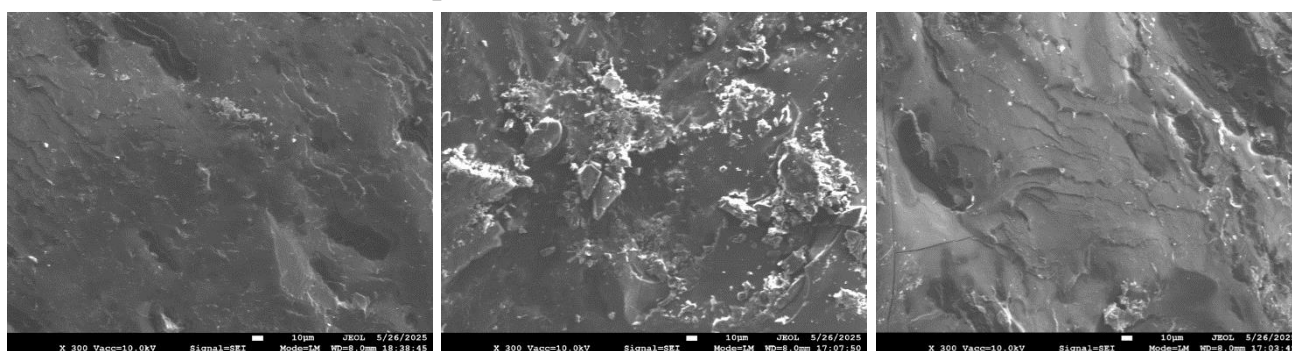


Рисунок 5 – Многослойная карта состава химических элементов в пробе
ПЫЛИ

Поверхности образцов пыли разных марок угля, которые представлены
в табл. 2, показаны на рис. 6.



а

б

в

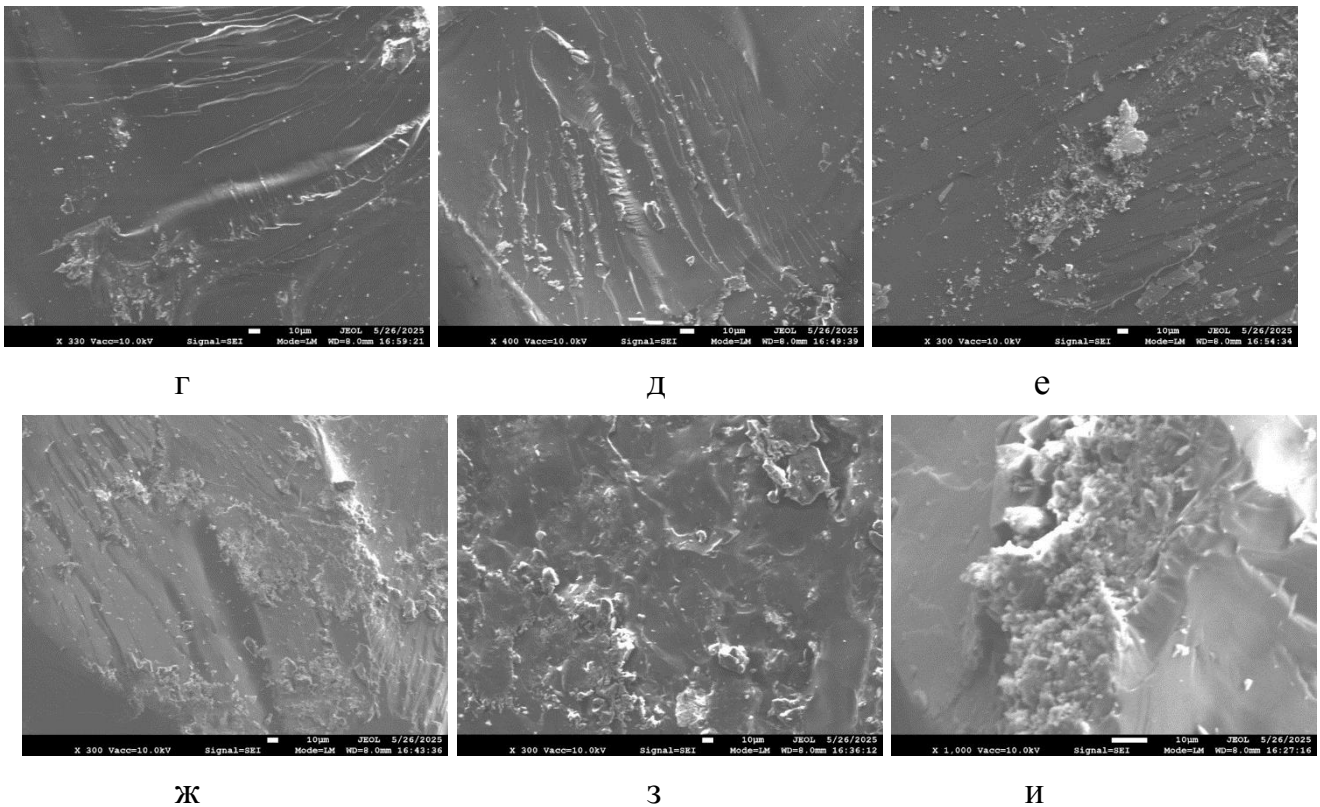


Рисунок 6 – Снимки угля марки угля под сканирующим электронным микроскопом

где: а – пласт Е1 (марка угля Ж); б – пласт Е5 (марка угля Ж); в – пласт Болдыревский (марка угля ГЖ); г – пласт Поленовский (марка угля ГЖ); д – шахта Алмазная, (марка угля А); е – шахта Талдинская – Западная 1 (марка угля ДГ); ж – шахта Грамотеинская (марка угля Д); з – пласт К5, шахта Осинниковская (марка угля Ж); и – шахта Шубакроль Комир Казахстан (марка угля ЗБВ).

При выборе мероприятий по борьбе с пылью необходимо учитывать качественные характеристики углей (физико-химические свойства, фракционный состав и плотность, зольность и др.), которые влияют на пылевую обстановку в зонах разгрузки угля. Основными способами пылеподавления при ведении погрузочно-разгрузочных работ являются: орошение, увлажнение, использование пылеподавляющих добавок, вентиляция (аспирация) и другие.

Правильность выбора смачивателя для достижения оптимального результата в пылеподавлении основано на учете физико-химических характеристик угольной пыли. Были проведены лабораторные исследования смачиваемости каменного и бурого углей. Для проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности смачивания были

выбраны каменные угли средней стадии метаморфизма (марки Ж, ГЖ) и бурые угли низкой стадии метаморфизма (марка ЗБВ) (табл. 3).

Были подготовлены пробы угольной пыли (К1-К5) размером 0,5-1,0 мм. Масса одной пробы составляла 1 г. В качестве смачивателя использовался смачиватель СП-01 (ТУ 2481-002-95498669-2008).

Результаты смачивания угольной пыли при различных концентрациях смачивателя представлены в табл. 4 и на рис. 7.

Таблица 4 – Время осаждения пыли в растворе смачивателя, секунды

№ п/п	Образцы углей	Концентрация смачивателя, %			
		0	0,3	0,5	1,0
1	К1 (марка Ж)	Не оседает	25	15	10
2	К2 (марка Ж)	Не оседает	12	10	6,65
3	К3 (марка ГЖ)	Не оседает	10	8	6
4	К4 (марка ГЖ)	Не оседает	25	20	15
5	К5 (марка Б)	Нет данных	7	5,63	4,65

Анализ данных, представленных на рис. 7, показывает, что время осаждения пыли бурых углей меньше, чем для пыли каменных – от 2-х до 5 раз, причем, если время осаждения пыли бурых углей уменьшается в 1,5 раза при увеличении концентрации смачивателя от 0,3% до 1,0 %, то для пыли каменных углей уменьшение этого времени равно 2,5 раз.

Для дальнейших исследований была выбрана пыль бурых углей, размер фракций составлял до 43 мкм, масса одной пробы пыли равнялась 1 г. Были выбраны концентрации смачивателя, удовлетворяющие сорбционной емкости пыли в отношении поверхностно-активных веществ. Температура раствора смачивателя составляла: 60, 40, 22 и 5°C. Время осаждения пыли представлено в табл. 5. Были рассчитаны краевой угол смачивания, теплота смачивания и поверхностное натяжение (табл. 5). Величина поверхностного натяжения для воды принимается равной 73 мН/м, средняя теплота смачивания угля водой принимается равной 11,6 кал/г ($48,53 \cdot 10^{-3}$ Дж/кг).

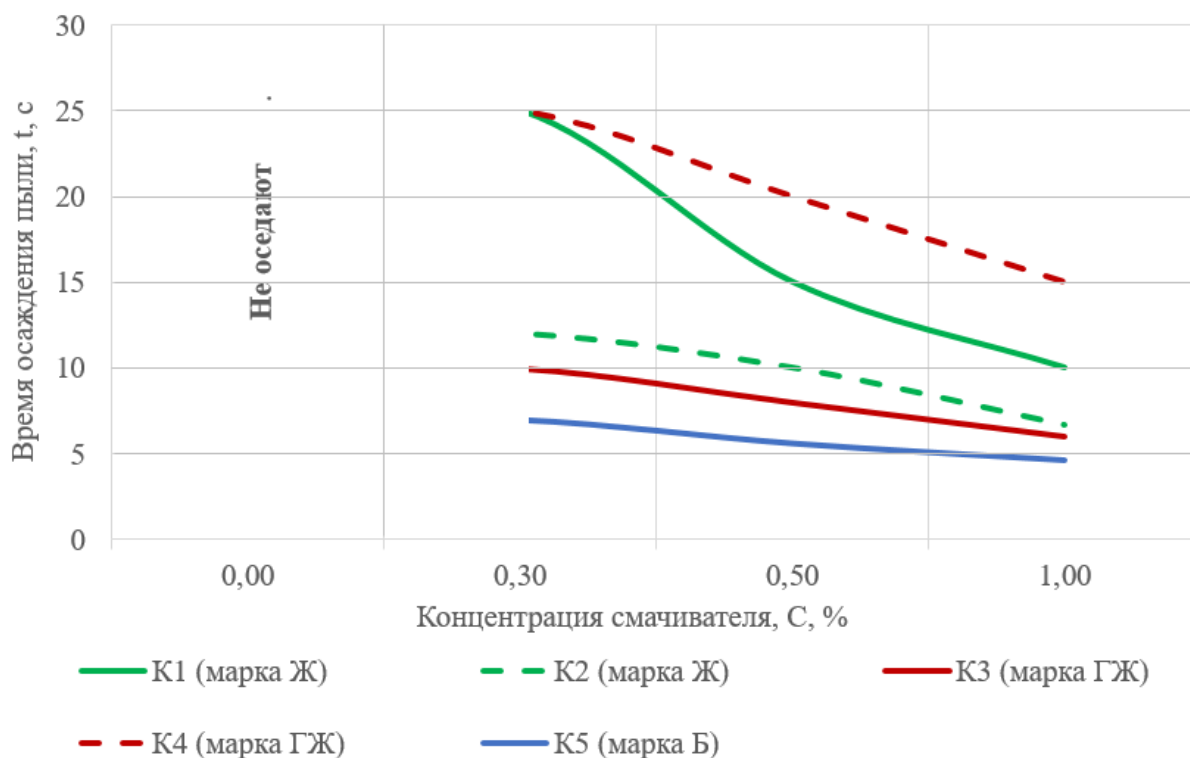


Рисунок 7 – Зависимость времени осаждения пыли от концентрации смачивателя

Таблица 5 – Результаты расчета характеристик обработки угольной пыли при применении смачивателя СП-01

№ п/п	Температура раствора, Т		Концентрация смачивателя, С, %	Время смачивания, t, с	Теплота смачивания, $W \cdot 10^3$, Дж/кг	Краевой угол смачивания, θ , градус	Поверхностное натяжение раствора, σ , мН/м
	°C	K					
1	60	333	0	3600	3,26	89	67,17
2	40	313	0	н/см	-20,38	94	69,55
3	22	295	0	н/см	-58,16	101	72,75
4	5	278	0	н/см	-76,57	104	75,62
5	60	333	1,5	28,9	53,55	58,3	58,7
6	40	313	1,5	34,4	57,74	62	60,1
7	22	295	1,5	35,2	67,36	62,5	60,9
8	5	278	1,5	36	70,29	63	62,1
9	60	333	2,5	29,8	41,21	59	52,43
10	40	313	2,5	26	40,58	55	51,5
11	22	295	2,5	28,5	56,90	58	55,2
12	5	278	2,5	37,1	53,55	64	69,2
13	60	333	3,5	10,1	35,98	28	41,6
14	40	313	3,5	16,2	30,96	30,6	42,8
15	22	295	3,5	16	27,82	30,5	42,5
16	5	278	3,5	22,3	35,15	42	49,8

Примечание: н/см – не смачивается.

Важным выводом из анализа данных табл. 5 следует тот факт, что в чистой воде пыль бурых углей не оседает, и только при температуре воды 60°C

пыль оседает в течение одного часа, что свидетельствует о необходимости добавления в воду поверхностно-активных веществ.

Анализ графических зависимостей (рис.8) показывает, что в диапазоне исследованных значений концентраций и температур смачивателя концентрация является более сильным фактором для снижения поверхностного натяжения по сравнению с температурным фактором. При увеличении температуры от 5 до 60°C поверхностное натяжение снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя.

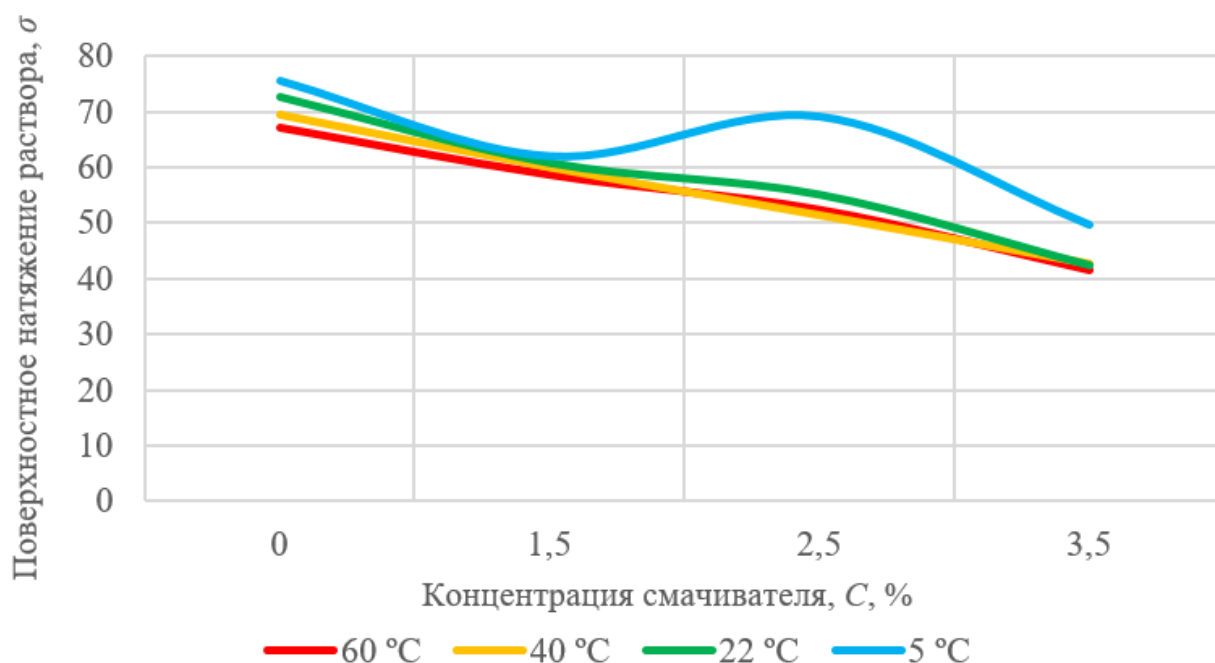


Рисунок 8 – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации раствора смачивателя при разных температурах раствора

Для пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями предлагается применять орошение с использованием туманообразователей. При применении туманообразователей имеет место седиментационное пылеулавливание. Были проведены эксперименты по оценке скорости седиментации пылевых частиц в зависимости от концентрации раствора смачивателя. Были выбраны пять диапазонов размеров пылевых частиц (x , мм): $x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$; $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$. Для седиментации частиц использовались водные растворы шести концентраций

смачивателя СП-01. Замерялось время осаждения пылевых частиц. Было получено время седиментации каждой фракции в зависимости от концентрации раствора смачивателя (табл. 6).

Таблица 6 – Время седиментации пылевых частиц бурого угля

№ п/п	Концентрация смачивателя, %	Время осаждения пылевых частиц, с, по фракционному составу (x), мм				
		$x < 0,04$	$0,04 \leq x < 0,071$	$0,071 \leq x < 0,1$	$0,1 \leq x < 0,25$	$0,25 \leq x < 0,5$
1	0,05	1450	1300	980	520	240
2	0,1	670	530	220	192	75
3	0,15	295	217	198	114	70
4	0,2	217	160	150	56	55
5	0,25	200	144	135	31	20
6	0,3	98	73	70	26	19

По данным табл. 6 построены графики зависимостей времени осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01 (рис. 9). Анализ данных показывает, что для крупных (последних трех диапазонов: $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$) фракций пыли резкое изменение времени осаждения частиц происходит при концентрации смачивателя 0,1%. Среднее время осаждения этих фракций пыли равно 162 с. Для более мелких фракций пыли ($x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$) время осаждения больше и составляет в среднем 600 с, что 3,7 раз больше, чем для крупных частиц пыли.

Равнодействующая сила, вызывающая седиментацию, рассчитывалась по формуле:

$$F_{\text{сед}} = F_g - F_A = m_{\text{от}}g = v(\rho - \rho_0)g, \quad (1)$$

где $m_{\text{от}}$ — относительная масса частицы (с учетом плотности среды; $m_{\text{от}} = m - v\rho_0$); m , v — соответственно масса и объем частицы; ρ_0 — плотность дисперсионной среды; g — ускорение свободного падения; ρ — плотность частицы дисперсной фазы.

При расчете силы седиментации (табл. 7) плотность бурого угля принимали 1500 кг/м^3 ; плотность воды — 1000 кг/м^3 ; объем частицы рассчитывали по формуле $v = (4/3)\pi r^3$.

Расчёты равнодействующей силы, вызывающей седиментацию представлены в табл. 7.

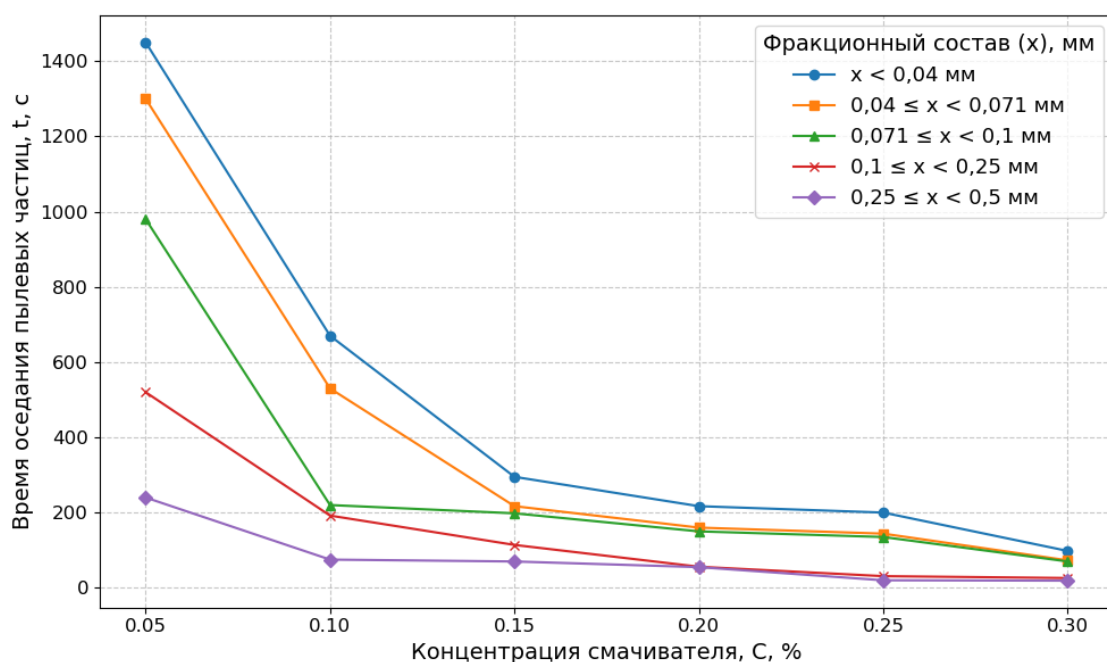


Рисунок 9 – Зависимость времени осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01

Таблица 7 – Равнодействующая сила, вызывающая седиментацию частиц

№ п/п	Средний радиус частицы, r , м	Объем частицы, v , m^3	Сила седиментации, $F_{сед}$, Н
1	$2 \cdot 10^{-5}$	$33,52 \cdot 10^{-15}$	$0,164 \cdot 10^{-9}$
2	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$697,11 \cdot 10^{-15}$	$0,342 \cdot 10^{-8}$
3	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$2573,18 \cdot 10^{-15}$	$0,126 \cdot 10^{-7}$
4	$17,5 \cdot 10^{-5}$	$22455,78 \cdot 10^{-15}$	$0,110 \cdot 10^{-6}$
5	$37,5 \cdot 10^{-5}$	$220957,03 \cdot 10^{-15}$	$0,108 \cdot 10^{-5}$

Примечание: плотность бурого угля принята 1500 кг/м^3 ; плотность воды – 1000 кг/м^3 .

Анализ данных табл. 7 показывает, что сила седиментации для частиц радиусом менее 71 мкм на 3-4 порядка меньше силы седиментации для частиц радиусом 250 мкм, что объясняет увеличение времени седиментации мелких частиц в 3,7 раза по сравнению со временем седиментации более крупных частиц. Поскольку при концентрации смачивателя 0,1% происходит резкое снижение времени седиментации для всех фракций пыли, то можно сделать вывод, что в диапазоне концентраций 0,07-0,1% находится критическая концентрация мицеллообразования для смачивателя СП-01 (табл. 8).

Таблица 8 – Скорость седиментации пылевых частиц бурого угля

№ п/п	Концентрация, %	Скорость седиментации, см/с				
		Фракция пылевых частиц (x), мм				
		$x < 0,04$	$0,04 \leq x < 0,071$	$0,071 \leq x < 0,1$	$0,1 \leq x < 0,25$	$0,25 \leq x < 0,5$
1	0,05	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$19,23 \cdot 10^{-3}$	$41,66 \cdot 10^{-3}$
2	0,1	$16,39 \cdot 10^{-3}$	$18,87 \cdot 10^{-3}$	$45,45 \cdot 10^{-3}$	$52,08 \cdot 10^{-3}$	$133,33 \cdot 10^{-3}$
3	0,15	$33,9 \cdot 10^{-3}$	$46,08 \cdot 10^{-3}$	$50,5 \cdot 10^{-3}$	$87,7 \cdot 10^{-3}$	$142,86 \cdot 10^{-3}$
4	0,2	$46,08 \cdot 10^{-3}$	$69,4 \cdot 10^{-3}$	$66,6 \cdot 10^{-3}$	$178,57 \cdot 10^{-3}$	$181,82 \cdot 10^{-3}$
5	0,25	$50,0 \cdot 10^{-3}$	$69,04 \cdot 10^{-3}$	$74,07 \cdot 10^{-3}$	$322,58 \cdot 10^{-3}$	$500,0 \cdot 10^{-3}$
6	0,3	$10,2 \cdot 10^{-2}$	$13,7 \cdot 10^{-2}$	$14,28 \cdot 10^{-2}$	$38,46 \cdot 10^{-2}$	$52,63 \cdot 10^{-2}$

По полученным данным построен график зависимости скорости оседания частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01, представленный на рис. 10. Анализ данных показывает, что при концентрации 0,2% происходит существенный (в 4,5 раза) рост скорости седиментации для крупных фракций пылевых частиц.

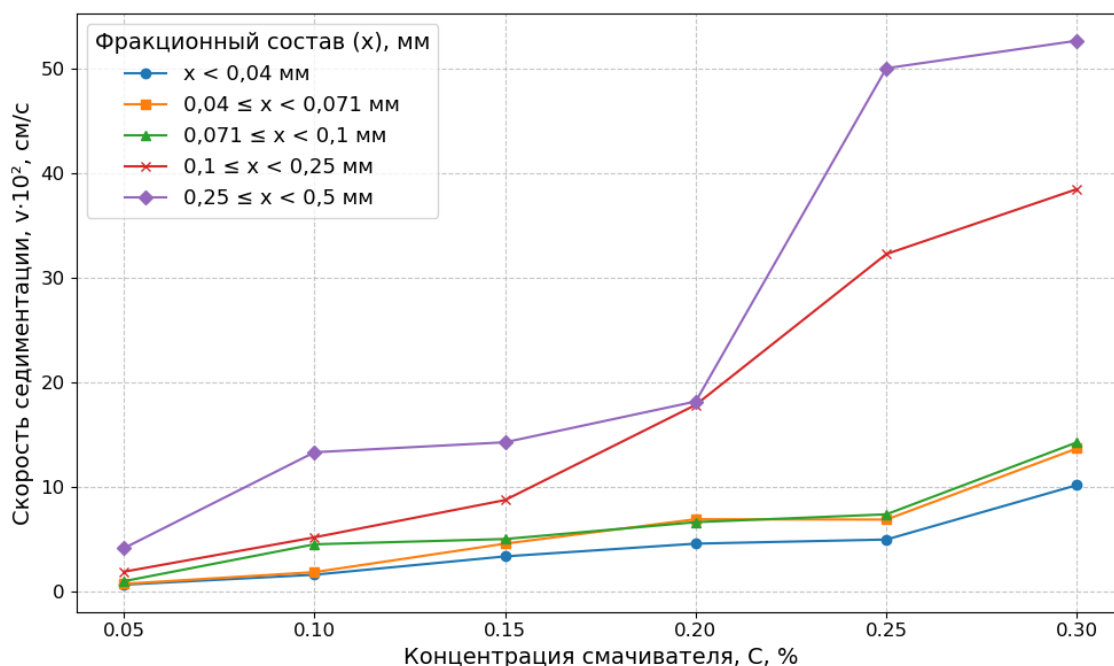


Рисунок 10 – Зависимость скорости осаждения частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01

Данные рис. 10 подтверждают, что при равных концентрациях смачивателя, даже при снижении вязкости раствора с увеличением концентрации смачивателя до определенного значения (после которого идет

возрастание вязкости) наибольший вклад в возрастание скорости седиментации оказывает радиус частиц (скорость седиментации частицы пропорциональна квадрату ее радиуса). Для наших данных это превышение скорости достигает 5 раз.

Ранее автором было показано, что содержание респираторной пыли размером до 7,5 мкм в здании вагоноопрокидывателя составляет до 95 %. На практике основным способом подавления пыли продолжает оставаться орошение, сущность которого заключается в том, что водяной аэрозоль, полученный при помощи оросителей (форсунок), направляется на источник пылеобразования или пылевое облако. Частицы пыли, взвешенные в воздухе, сталкиваются с каплями воды, улавливаются ими и под действием сил тяжести и инерции оседают на почву и т.д.

Коэффициент захвата пылевой частицы каплей жидкости представляет собой безразмерную величину, характеризующую вероятность столкновения и последующего улавливания частицы каплей в газовой среде. Для распылительных систем принято рассматривать три основных механизма захвата: броуновскую диффузию, перехват и инерционное соударение:

$$E \approx E_{Br} + E_{int} + E_{imp} \quad (2)$$

где E_{Br} — коэффициент захвата за счёт броуновской диффузии; E_{int} — коэффициент захвата за счёт перехвата; E_{imp} — коэффициент захвата за счёт инерционного соударения.

В соответствии с расчётными зависимостями для системы «аэрозольная частица - жидкая капля» отдельные составляющие коэффициента захвата можно записать следующим образом.

Для броуновской диффузии:

$$E_{Br}(d_p, D_d) = 2 \left(\frac{4}{3\pi Pe} \right)^{1/2} \left(\frac{(1-\alpha)(3\sigma+4)}{J+\sigma K} \right)^{1/3} \quad (3)$$

для перехвата:

$$E_{int}(d_p, D_d) = \frac{1-\alpha}{J+\sigma K} \left[\frac{R}{1+R} + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{1+R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right] \quad (4)$$

для инерционного соударения:

$$E_{imp}(d_p, D_d) = \left(\frac{Stk}{Stk+0.35} \right)^2 \quad (5)$$

где d_p — диаметр пылевой частицы, м; D_d — диаметр капли жидкости, м; α — объёмная доля жидкости в газовом объёме; $\sigma = \mu_w/\mu_a$ — отношение вязкости жидкости к вязкости газа; J, K — гидродинамические коэффициенты.

Определяющим параметром эффекта касания является безразмерное отношение диаметра частицы к диаметру капли

$$R = \frac{d_p}{D_d} \quad (6)$$

Механизм захвата за счет инерции тем эффективнее, чем выше скорость фильтрации и больше масса частицы. Определяющим параметром инерционного осаждения является критерий Стокса, характеризующий отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды.

Эти зависимости прямо показывают, что коэффициент захвата зависит прежде всего от диаметра частицы d_p , диаметра капли D_d , относительной скорости U , плотности частицы ρ_p , вязкости воздуха μ_a и коэффициента диффузии частицы в воздухе.

С физической точки зрения рост размера частицы усиливает вклад инерционного механизма, так как число Стокса пропорционально d_p^2 . Уменьшение диаметра капли при прочих равных увеличивает отношение $R = d_p/D_d$ и также способствует росту Stk , то есть, как правило, повышает вероятность захвата. Вместе с тем избыточное уменьшение капель может приводить к снижению эффективности за счёт уменьшения относительной скорости частица-капля. Для мелких частиц доминирует диффузионный механизм, для промежуточного диапазона характерна зона пониженной улавливаемости, а для более крупных частиц возрастает роль инерционного соударения.

Были рассчитаны значения коэффициента захвата для частиц пыли для PM2.5 и PM10. Полученные результаты показывают выраженную зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли. При фиксированном диаметре капли 100 мкм увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата примерно от 0,21 до 0,88 (примерно в 4,2 раза). Это объясняется прежде всего увеличением числа Стокса и резким усилением инерционного механизма улавливания. Для PM2.5 вклад броуновской диффузии и перехвата остаётся сравнительно малым, тогда как для PM10 доминирует инерционное соударение. В целом расчёт

подтверждает положение о том, что при прочих равных условиях крупные частицы улавливаются каплями существенно эффективнее, чем тонкодисперсные фракции. Также существует оптимальное соотношение между размерами капли и пылинки, которое состоит в том, что диаметр капли жидкости должен быть в 5-10 раз больше, чем диаметр пылинки. Зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли является ключевой задачей в проектировании систем пылеподавления.

Были проведены расчеты (табл. 9) вклада каждого механизма захвата и общего коэффициента захвата для размеров пыли 2,5 мкм (область минимальной эффективности улавливания пыли) и 10 мкм (максимальный размер респираторной пыли) для размеров капли жидкости от 2,5 мкм до 200 мкм. Общий коэффициент захвата был рассчитан при орошении без применения ПАВ и с применением ПАВ СП-01, коэффициент эффективности смачивания был принят $\varphi = 1,36$.

Таблица 9 – Расчеты коэффициента захвата пыли каплями жидкости без применения ПАВ и с применением ПАВ СП-01

№ п/п	Диаметр капли, мкм	Коэффициент захвата, E				
		Броуновская диффузия, E_{Br}	Перехват, E_{int}	Инерционное соударение, E_{int}	E (без применения ПАВ)	E (с применением ПАВ)
1	2	3	4	5	6	7
Пыль размером 2,5 мкм						
1	2,5	0,003787	0,386111	0,94185	1	1
2	5	0,002678	0,17358	0,888628	1	1
3	10	0,001894	0,063911	0,794876	0,860681	1
4	15	0,001546	0,033333	0,715214	0,750093	1
5	20	0,001339	0,020604	0,646954	0,668896	0,910603
6	30	0,001093	0,010296	0,536786	0,548175	0,746226
7	40	0,000947	0,006267	0,452537	0,45975	0,625872
8	50	0,000847	0,004268	0,386671	0,391786	0,533335
Пыль размером 10 мкм						
9	10	0,000924	0,386111	0,984968	1	1
10	20	0,000654	0,17358	0,970272	1	1
11	30	0,000534	0,09875	0,955902	1	1
12	40	0,000462	0,063911	0,94185	1	1
13	50	0,000413	0,044877	0,928105	0,973395	1
14	100	0,000292	0,014086	0,863693	0,878072	1
15	150	0,000239	0,007005	0,805761	0,813005	1
16	200	0,000207	0,004268	0,753468	0,757943	1

По результатам расчета (табл. 9) построены графики зависимости коэффициента захвата пыли жидкостью в зависимости от размеров пылинки и

капли жидкости с применением ПАВ при орошении и без применения ПАВ (рис. 11, 12).

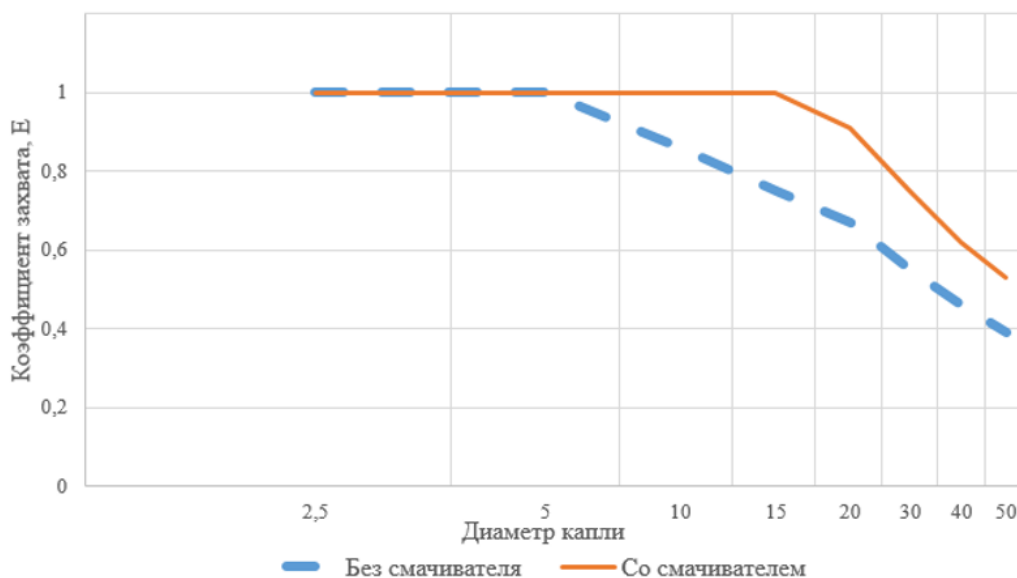


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента захвата частицы пыли размером 2,5 мкм от размера капли жидкости

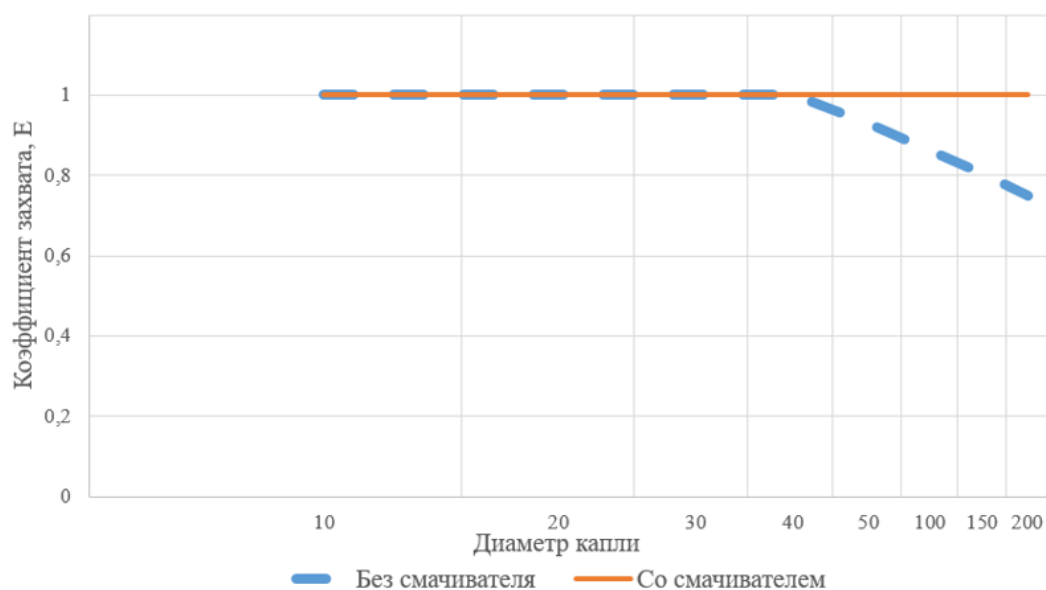


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента захвата частицы пыли размером 10 мкм от размера капли жидкости

Анализ данных табл. 9 и рис. 11, 12 показывает, что соотношение размеров пыли и жидкости играет существенную роль в процессе захвата пыли жидкостью при орошении, причем для размеров пыли от 1 до 3 мкм наблюдается область минимальной эффективности улавливания, связанная с переходом между доминирующими механизмами: с броуновской диффузии на

инерционное соударение. Для частицы пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра пыли к диаметру капли не должно превышать 2. Для частицы пыли диаметром 10 мкм это соотношение равно 4-5.

Применение смачивателя СП-01 расширяет диапазон эффективного пылеулавливания для частицы пыли размером 2,5 мкм с 2 до 6 раз (размер капли 15 мкм). Для частицы пыли размером 10 мкм диапазон эффективного пылеулавливания увеличивается с 4 до 20 раз.

Экспериментальные исследования дисперсного состава витающей пыли в здании вагоноопрокидывателя показали, что диапазон частиц пыли составляет 0,1-22,5 мкм с модой 3-4 мкм. Содержание респирабнльной пыли размером до 7,5 мкм составляет 95%. Исходя из этого, предлагается создавать размер капель жидкости при пылеподавлении в здании вагоноопрокидывателя 10 мкм с использованием 0,1%-ного содержания смачивателя СП-01.

Для эффективного пылеподавления при разгрузке угля вагоноопрокидывателями рекомендуется создавать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрации смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 4-5 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применения смачивателя СП-01 0,1%.

Оценку пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли РМ10 и РМ2,5 в рабочей зоне предлагается осуществлять путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов, увеличивающих общую пылевую нагрузку, если в массе витающей пыли присутствуют фракции РМ10 и РМ2,5.

Введем коэффициент K_i - коэффициент учета фракционного состава респирабельной пыли РМ10 и РМ2,5

$$K_i = \frac{D_i}{100}, \quad (8)$$

где D - процентное содержание фракции пыли; $i = 1$ – фракция пыли РМ2,5; $i = 2$ – фракция пыли РМ10.

Коэффициент K_i изменяется от 0 до 1: значение $K_i = 0$, если данная фракция отсутствует в общей массе пыли; $K_i = 1$, если вся масса пыли состоит из данной фракции.

Расчет пылевой нагрузки (ПН) на органы дыхания рабочего (или группы рабочих, если они выполняют аналогичную работу в одинаковых условиях) рассчитывается исходя из фактических среднесменных концентраций АПФД в воздухе рабочей зоны, объема легочной вентиляции (зависящего от тяжести труда) и продолжительности контакта с пылью:

$$\text{ПН} = K_{cc}NTQ, \quad (9)$$

где K_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м³; N – число рабочих смен в календарном году; T – количество лет контакта с АПДФ; Q – объем легочной вентиляции за смену, м³.

С учетом коэффициентов K_1 и K_2 формула (9) примет вид:

$$\text{ПН}_{10+2.5} = K_{cc}NTQ(1 + 0,5K_1 + 0,25K_2). \quad (10)$$

В формуле (10) коэффициент K_1 и K_2 отражают увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций PM10 и PM2,5. Если фракция PM2,5 отсутствует, но вся масса пыли состоит из фракций PM10, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,25 раз. Если фракция пыли PM10 отсутствует, и вся масса пыли состоит из фракций PM2,5, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,5 раза. При отсутствии фракций PM10 и PM2,5 пылевая нагрузка рассчитывается по стандартной формуле (9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научной квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной для металлургической отрасли задачи снижения запыленности воздуха в углеподготовительных цехах коксохимических заводов путем использования высоконапорного гидрообеспыливания с использованием туманообразователей на основе установленных зависимостей скорости седиментации частиц угольной пыли от концентрации смачивателя СП-01 и зависимостей коэффициента захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью с целью улучшения условий труда работников горно-металлургических предприятий.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Исследованиями по смачиваемости пыли углей марок ЗБВ, ГЖ, Ж установлено, что время осаждения пыли бурых углей меньше, чем для пыли каменных – от 2-х до 5 раз, причем, если время осаждения пыли бурых углей уменьшается в 1,5 раза при увеличении концентрации смачивателя от 0,3% до 1,0 %, то для пыли каменных углей уменьшение этого времени равно 2,5 раз, то есть действия смачивателя более эффективно для каменных углей.

2. Установлено, что поверхностное натяжение рабочей жидкости в диапазоне температур от 5 до 60 °С снижается в 1,12 раз, а при увеличении концентрации смачивателя от 0 до 3,5% поверхностное натяжение снижается в 1,6 раз, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя, т.е. в указанном диапазоне температур и концентраций влияние концентрации на снижение поверхностного натяжения в 1,5 раза эффективнее по сравнению с увеличением температуры смачивателя.

3. Химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается для углей различных стадий метаморфизма. Образцы углей низкой стадии метаморфизма имеют повышенное содержание атомов кислорода. Образцы углей высокой стадии метаморфизма содержат больше углерода. Повышенное содержание кислорода в низкометаморфизованных углях, обуславливает лучшую смачиваемость бурых углей по сравнению с углями средней стадии метаморфизма.

4. Установлено, что для крупных фракций пыли (из диапазона, мкм: $0,071 \leq x < 0,1$; $0,1 \leq x < 0,25$; $0,25 \leq x < 0,5$) резкое изменение времени осаждения частиц происходит при концентрации смачивателя 0,1%. Среднее время осаждения этих фракций пыли равно 162 с. Для более мелких фракций пыли ($x < 0,04$; $0,04 \leq x < 0,071$, мкм) время осаждения больше и составляет в среднем 600 с, что в 3,7 раз больше, чем для крупных частиц пыли.

5. Установлено, что сила седиментации для частиц радиусом менее 71 мкм на 3–4 порядка меньше силы седиментации для частиц радиусом 250 мкм, что объясняет увеличение времени седиментации мелких частиц в 3,7 раза по сравнению со временем седиментации более крупных частиц. При концентрации смачивателя 0,1% происходит резкое снижение времени

седиментации для всех фракций пыли, следовательно, в диапазоне концентраций 0,07-0,1% находится критическая концентрация мицеллообразования для смачивателя СП-01.

6. Результаты теоретических исследований зависимости коэффициента захвата пылевых частиц каплями жидкости показывают выраженную зависимость коэффициента захвата от соотношения размеров частицы и капли. При фиксированном диаметре капли 100 мкм увеличение диаметра частицы от 2,5 мкм до 10 мкм приводит к росту коэффициента захвата примерно от 0,21 до 0,88 (примерно в 4,2 раза). Это объясняется прежде всего увеличением числа Стокса и резким усилением инерционного механизма улавливания. Для PM_{2.5} вклад броуновской диффузии и перехвата остаётся сравнительно малым, тогда как для PM₁₀ доминирует инерционное соударение.

7. Установлено, что соотношение размеров пыли и жидкости играет существенную роль в процессе захвата пыли жидкостью при орошении, причем для размеров пыли от 1 до 3 мкм наблюдается область минимальной эффективности улавливания, связанная с переходом между доминирующими механизмами: с броуновской диффузии на инерционное соударение. Для частицы пыли размером 2,5 мкм для эффективного пылеулавливания отношение диаметра пыли к диаметру капли не должно превышать 2. Для частицы пыли диаметром 10 мкм это соотношение равно 4-5.

8. Применение смачивателя СП-01 расширяет диапазон эффективного пылеулавливания для частицы пыли размером 2,5 мкм с 2 до 6 раз (размер капли 15 мкм). Для частицы пыли размером 10 мкм диапазон эффективного пылеулавливания увеличивается с 4 до 20 раз.

9. Для уменьшения доли респираторной фракции пыли рекомендуется создавать туман при следующих параметрах орошения: расход воды на 1 м³ очищаемого воздуха 0,5-1 л, концентрации смачивателя СП-01 0,1%, давление водовоздушной смеси 4-5 МПа. Рекомендуется создавать размер капель 10 мкм, расстояние между форсунками ≤1 м. Эффективность пылеподавления может быть повышена при увеличении расхода воды до 0,5-1,5 л/м³ и применения смачивателя СП-01 0,1%.

10. Разработана методика оценки пылевой нагрузки на органы дыхания рабочих с учетом массовых концентраций пыли PM₁₀ и PM_{2,5} путем введения в расчетную формулу пылевой нагрузки дополнительных коэффициентов K₁ и

K_2 , отражающих увеличение пылевой нагрузки в зависимости от присутствия пылевых фракций PM10 и PM2,5. Если фракция PM2,5 отсутствует, но вся масса пыли состоит из фракций PM10, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,25 раз. Если фракция пыли PM10 отсутствует, и вся масса пыли состоит из фракций PM2,5, то пылевая нагрузка увеличивается в 1,5 раза. При отсутствии фракций PM10 и PM2,5 пылевая нагрузка рассчитывается по стандартной формуле.

Результаты исследований отражены в следующих публикациях автора:

1. Скопинцева О.В., Пернебек Б.П., Федоткин И.О. Повышение эффективности пылеподавления тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле цехов углеподготовки // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 12. С. 61–66. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-12-61-66. (ВАК, Scopus) (рекомендации использования научных результатов).

2. Рыбичев А.А., Пернебек Б.П. Оценка эффективности пылеподавления с использованием смачивающих растворов // Уголь. – 2023. – №.12. – С. 60-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-60-63. (Scopus) (проведение лабораторных исследований, формулировка научных положений).

3. Пернебек Б.П., Семенов Ю.В., Рыбичев А.А., Козлова Л.О. Оценка эффективности смачиваемости угольной пыли при разных температурах растворов // Уголь. – 2024. – № 1. – С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75. (Scopus) (проведение лабораторных исследований, формулировка научных положений).

4. Пернебек Б.П., Рассолова М.А., Серянина А.В. К вопросу обеспыливания воздуха при погрузке и транспортировании угля // Уголь. – 2024. – № 5. – С. 107-110. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-107-110. (Scopus) (обоснование актуальности работы, постановка задач исследований).

5 Пернебек Б.П., Федоткин И.О., Рассолова М.А., Серянина А.В., Андреев А.А., Степанов Е.А., Чикалин Н.М., Нежелская Д.А. Исследование процесса седиментации частиц бурого угля // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-70-75. (Scopus) (проведение лабораторных исследований, формулировка научных положений).

6. Пернебек Б.П., Рыбичев А.А., Федоткин И.О., Оразхан А.А., Мадмарова А. Исследование критической концентрации мицеллообразования при смачивании пыли бурых углей // Уголь. – 2025. – № 3. – С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-27-32. (Scopus) (проведение лабораторных исследований, формулировка научных положений).

7. Пернебек Б.П. Эффективность захвата тонкодисперсных фракций пыли жидкостью при гидрообеспыливания на горно-металлургических предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 3 (специальный выпуск 9). — С. 3–14. DOI:

10.25018/0236_1493_2026_3_9_3 (ВАК) (проведение расчетов, формулировка научных положений).

8. Pernebek B. P., Fedotkin I. O., Rybichev A. A., Rassolova M. A. Study of the Effectiveness of Wetting Brown Coal Dust // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proceedings of the International Conference (January 15, 2025, Beijing, China). – Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2025. – P. 124-129 (апробация результатов исследований).