



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

## Исследование эффективности применения различных веществ для пылеподавления при перевалке гранулированной серы

В.В.Лисай<sup>1</sup>, Ю.Д.Смирнов<sup>2</sup>, А.В.Иванов<sup>2</sup>✉, Г.Боровски<sup>3</sup><sup>1</sup> ООО «Стивидорно-судоходная компания», Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Люблинский технический университет, Люблин, Польша

**Как цитировать эту статью:** Лисай В.В., Смирнов Ю.Д., Иванов А.В., Боровски Г. Исследование эффективности применения различных веществ для пылеподавления при перевалке гранулированной серы // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16323. С. 108-119. [EDN OBNFBV](#)

### Аннотация

Статья посвящена проблеме пыления при перевалке гранулированной серы и существующим способам пылеподавления. Представлен анализ различных методов снижения пылевыделения на объектах хранения и транспортировки гранулированной серы. Отмечена необходимость применения специальных реагентов для повышения эффективности пылеподавления и повторной грануляции измельченной истиранием серы. Серная пыль, полученная с портового терминала при перевалке технической серы, проанализирована на гранулометрический состав. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения различных веществ для пылеподавления серы (алкилполигликозиды, силикат натрия, крахмал). Лабораторная установка представляла бункер, внутри которого помещался испытуемый образец пылящего материала. Образец подвергался аэродинамическому воздействию потоком воздуха с заданной скоростью. Пылемером-нефелометром с пробоотборной трубкой, выведенной в геометрический центр бункера, измерялись концентрации твердых взвешенных веществ. Эффективность средств пылеподавления определялась на основе сравнения значений концентраций, полученных на сухом и обработанном образцах. Для пылеподавления на объектах обращения с гранулированной серой предложено использовать состав на основе неионогенных ПАВ, представленных смесью олигомеров C12-14-алкилгликозидов (1-1,5 %), дополнительно содержащий смесь полисахаридов амилозы и амилопектина в виде крахмала растворимого (1-2,5 %) и воду. Пылеподавитель показал стабильно высокую эффективность пылеподавления как при измерении непосредственно сразу после орошения (98,3 %), так и по истечении выжидаемого времени (99,7 %). Разработанный состав обеспечивает повышение пылеподавляющей способности раствора и исключение возможности повторного пыления за счет образования на поверхности полимерной пленки, а также повторной грануляции измельченного истиранием продукта.

### Ключевые слова

серы; гранулированная сера; пыль; транспортирование; пересыпание; пылевыделение; пылеподавление

### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

Поступила: 03.10.2023

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 02.12.2024

Опубликована: 25.02.2025

### Введение

Сера является одним из основных ресурсов химической промышленности и добывается в большом количестве как побочный продукт при очистке нефти и природного газа. Соединения серы, присутствующие в значительных количествах в углеводородном сырье, вызывают широкий спектр негативных последствий, например, приводят к снижению КПД двигателей и коррозии трубопроводов. Для повышения качества продукта и снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций проводят десульфурацию или удаление серы из производимого топлива [1-3]. Области применения серы – производство минеральных удобрений (простой суперфосфат, сульфат аммония, сульфат аммония-натрия, сульфат калия, калимагнезия, сульфат магния, азотсульфат, сульфоаммофос и др.) [4, 5], серной кислоты [6], нефтедобыча (разбавление буровых и нефтяных растворов) [7], производство взрывчатых веществ [8]. Работы по моделированию сыпучести востребованы и требуют использования современного программного обеспечения [9-11].



Техническая сера производится в трех товарных формах: жидкой, комовой и гранулированной. Особенno распространена гранулированная сера из-за своих свойств и равномерного гранулометрического состава [12]. Выбросы и потери серы являются фактором ухудшения состояния компонентов природной среды [13], процессы хранения, транспортировки и перегрузки гранулированной серы сопровождаются интенсивным пылением, которое может негативно влиять как на здоровье работников, так и на состояние окружающей среды. Существующие на данный момент меры снижения пылевыделения показывают низкую эффективность [14, 15]. Наиболее часто применяемые на предприятиях системы орошения чистой водой отличаются простотой и экономичностью реализации [16], но обладают эффективностью менее 50 % из-за сильной гидрофобности пыли и высокого поверхностного натяжения воды [17].

Для улучшения смачиваемости растворов проводятся исследования технологий пылеподавления с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые способны сформировать изолирующий слой между поверхностью раствора и воздухом [18-20]. Поверхностно-активные вещества – это класс химических веществ, концентрация которых в растворе выше на поверхности, чем в объеме жидкости. Это означает, что ПАВ сосредотачивается на поверхности, где оно должно функционировать, что делает его очень экономичным в использовании, поскольку таким образом можно сохранить большинство свойств воды и улучшить смачивание при небольших затратах. Это явление известно как адсорбция и происходит на границах раздела жидкость – твердое вещество, жидкость – жидкость – воздух [21].

На микроуровне характеристики пены для подавления пыли тесно связаны с морфологией, которую можно охарактеризовать размером капель пены и их распределением. Как правило, более мелкие и однородные пузырьки пены больше подходят для подавления пыли, поскольку они позволяют обеспечить стабильность пылеподавления [22]. Фактически, когда пена попадает на источник пыли и захватывает ее частицы, количество, средний размер, распределение и однородность пузырьков в пене большой площади будут сильно влиять на эффективность подавления пыли пеной. Если размер пузырьков пены слишком велик или их распределение неравномерно, стабильность пылеподавления невысокая. Размер пузырьков и их распределение в определенной степени зависят от свойств системы раствора пенообразователя, таких как вязкость, поверхностное натяжение и т.д. [23]. Таким образом, чтобы улучшить морфологию пены и повысить эффективность пылеподавления, можно изменять свойства растворов пенообразователей [24].

Помимо ПАВ, для повышения эффективности пылеподавления могут применяться различные смачивающие реагенты, представляющие собой жирные спирты с добавлением гидроксида натрия, хлорида кальция, этилового спирта, бишофита, хлорида натрия и воды [25]. Однако большинство смачивающих реагентов имеют такие недостатки – антисанитарные и негигиенические свойства, сильное коррозионное воздействие на оборудование, сложные методы приготовления, высокая стоимость, неопределенность в отношении воздействия на здоровье человека и низкая биоразлагаемость, поэтому их применение может быть ограничено [26].

В статье проведен анализ научной литературы о существующих и разрабатываемых составах для пылеподавления, которые могли бы применяться для снижения пыления при перегрузке технической серы. Одним из таких средств пылеподавления является состав для покрытия элементарной серы с целью защиты от атмосферного воздействия [27], представляющий собой смесь силикона и водного раствора силиката натрия. Рассматриваемый состав готовится при соотношении силикона и силиката натрия от 25:75 до 75:25 мас.% и может дополнительно содержать красящую добавку. Состав также может отличаться тем, что силикат натрия находится в воде. Состав обладает высокой жаро- и морозостойкостью, хорошо сцепляется с серой, устойчив к проникновению воды и серобактерий, является огнестойким и относительно недорогим. Силикат натрия является высокоэффективным герметиком. Отмечается низкая эффективность пылеподавления осевшей ранее пыли, которая при взметывании становится источником вторичного загрязнения воздуха пылью.

Известен состав [28], представляющий собой смесь полисахарида и борной кислоты, которые при смешивании превращаются в гель с образованием стабильной эластичной корки при нанесении на поверхность. Образующееся покрытие повышает устойчивость субстрата и предотвращает потерю твердых частиц, т.е. пылеобразование. Первый основной компонент стабилизирующего состава представляет собой смесь, содержащую от 0,5 до 5 % полисахарида, например, крахмала. Как только два компонента объединяются для образования стабилизирующего соединения, молекулы

полисахаридов, особенно молекулы глюкозы, начинают связываться с боратом с контролируемой скоростью. Этот процесс, называемый комплексообразованием, образует слабые ковалентные связи, сравнимые со слабыми поперечными связями в полимере внутри полисахаридной матрицы. Применение данного состава может быть ограничено, поскольку борная кислота оказывает негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Использование полисахаридов в качестве пылеподавителей также отмечено в статье [29], описывающей применение состава на основе органических и быстроразлагающихся веществ с соотношением входящих компонентов (вода и смесь льна и крахмала) 98:2, обладающего высокой адгезионной способностью.

Известны исследования составов для подавления образования пыли с применением водных растворов высших алкилгликозидов [30-32]. Составы из высших алкилгликозидов являются известными материалами, обладающими поверхностно-активными свойствами. Алкилгликозиды обычно присутствуют в водном растворе примерно до 1 % по массе от водного раствора. С помощью подобных составов достигается длительный эффект подавления пыли. Кроме того, состав полностью биоразлагаем и не вреден для людей или окружающей среды.

Алкилгликозиды ( $R-(O-C_6H_{10}O_5)_nH$ ) относятся к классу неионогенных ПАВ и получаются из реакции, протекающей в присутствии сульфокислот и глюкозы при температуре до 140 °C или из бутиловых эфиров с последующей переэтерификацией. Неионогенные ПАВ обладают большой устойчивостью к воздействию щелочей, кислот и солей. Водные растворы алкилполигликозидов обладают наиболее высокой смачивающей способностью по сравнению с другими ПАВ и смачивателями [33].

### Методы

Исследовалась серная пыль, отобранная на терминале по перегрузке гранулированной серы из железнодорожных вагонов в морском торговом порту. Гранулометрический состав изучаемой пыли проводился с помощью анализатора размеров частиц HORIBA LA-950.

Определение эффективности снижения пылевыделения при орошении серы различными реагентами производилось на лабораторной установке конструкции Санкт-Петербургского горного университета, представляющей собой бункер пылеподавления БПП 001 и пылемер-нефелометр DustTrak 8533 (рис.1).

Пылемер DustTrak DRX модели 8533 – настольный анализатор со сменными импакторами для измерения массовой концентрации и фракционного состава пыли в реальном времени. Данная модель пылемера имеет внешний насос, позволяющий проводить непрерывный мониторинг концентрации взвешенных частиц. Анализатор пыли DustTrak измеряет установленные стандартами



Рис.1. Лабораторная установка пылеподавления в лаборатории Горного университета



фракции PM10, PM4, PM2,5 и PM1, а также содержание общей пыли одновременно, за счет совмещения в одном корпусе оптического счетчика и нефелометра. Диапазон измерения массовой концентрации аэрозоля составляет 0,1–150 мг/м<sup>3</sup>.

Перед проведением эксперимента в бункере пылеподавления с помощью метеометра МЭС-200А были измерены основные метеорологические характеристики: температура воздуха, относительная влажность воздуха и скорость воздушного потока.

Методика [34] определения эффективности пылеподавления реализовывалась следующим образом:

1. Для проведения испытаний в БПП 001 определили оптимальную массу навески изучаемой пыли серы – 15 г. Такая масса была подобрана путем выполнения подготовительных экспериментов с учетом текущих аэродинамических условий, формируемых в бункере пылеподавления концентраций пыли и пределов измерения и погрешностей пылемера.

2. До проведения испытаний с пылящими образцами бункер пылеподавления разбирали и обрабатывали пылесосом. Применение влажной уборки ограничивалось с целью предотвращения изменения сформированных условий эксперимента, в частности, влажности воздуха.

3. Во фронтальной части бункера устанавливали и закрепляли патрубок компрессора и запускали подачу воздуха. В месте размещения образцов пыли на дне бункера пылеподавления замеряли и регулировали скорость движения воздуха. После установления нужной скорости ветра (в проводимых работах скорость ветра в приземном слое рассматриваемой местности МТП «Усть-Луга» – 7 м/с), патрубок нагнетателя воздуха выключали.

4. Установку полностью собирали. В специальное отверстие на крышке бункера вводили держатель с трубкой забора воздуха, противоположный конец которой подсоединяли к пылемеру DustTrak 8533. С целью предотвращения накопления статического электричества бункер заземлялся специальным проводом.

5. Одновременно включали подачу воздуха в бункер с зафиксированной скоростью и запускали измерение концентраций пыли с помощью пылемера. Продолжительность измерений в проводимых работах составила 2 мин, что обусловлено неравномерностью создаваемых концентраций пыли в месте фиксирования концентраций пылемером. По итогу данного испытания получали фоновую концентрацию пыли до размещения в бункере пылящих образцов.

6. Далее все приборы и заземление отключали, трубку забора воздуха демонтировали, бункер полностью разбирали. На дно бункера в специально отмеченное место по центру размещали овальную форму площадью 110 см<sup>2</sup>. Испытуемую навеску серной пыли насыпали в форму и равномерно распределяли по поверхности с помощью шпателя. Таким образом на дне бункера формировалась отсыпанная навеска пыли формой эллипса.

7. Бункер полностью собирали аналогично п.4.

8. С запуском нагнетателя воздуха и пылемера-нефелометра проводили измерения концентраций пыли в бункере пылеподавления. Помимо фоновой концентрации, взметывались частицы пыли с поверхности размещенной на дне бункера навески. Продолжительность измерений составляла 2 мин.

9. Бункер снова разбирали и обрабатывали пылесосом. Остатки анализируемого образца пыли удаляли с помощью пылесоса.

## Обсуждение результатов

По полученным результатам гранулометрического анализа на приборе HORIBA LA-950V2 (рис.2) было установлено, что средний размер частиц пыли, отобранный на объекте обращения с серой, составляет 101 мкм. При этом наибольшее содержание в пробе (около 13 %) приходится на частицы диаметром 88 мкм, а доля частиц пылевидной фракции (менее 10 мкм), представляющей собой наибольший интерес, составляет около 0,2 %.

По результатам анализа научных публикаций о разработке составов для подавления пыли при перегрузке сыпучих материалов были выбраны следующие химические вещества для исследования:

- смесь олигомеров C12-14-алкилгликозидов (АПГ);
- натрий кремнекислый мета 5-водный Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O (силикат натрия);
- крахмал растворимый (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>6</sub>)<sub>n</sub>.

С этими веществами готовились водные растворы с тремя разными концентрациями, мас.%:

- алкилполигликозиды 0,5/1/1,5 %;
- силикат натрия 0,5/1/1,5 %;
- крахмал 1/2,5/5 %.

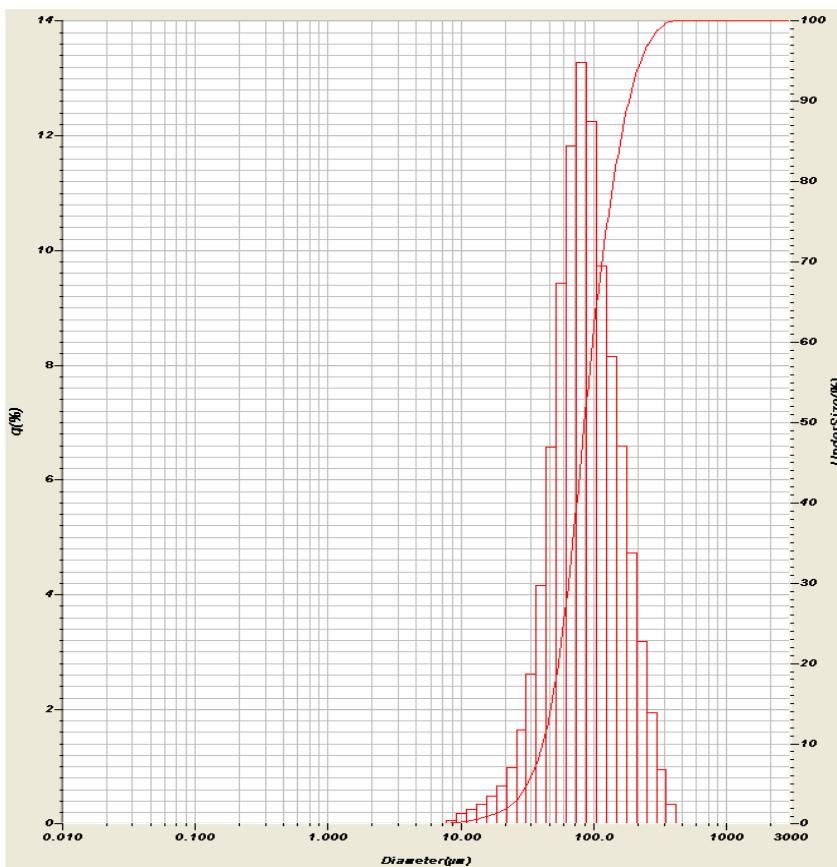


Рис.2. Гистограмма распределения крупности частиц пыли, отобранный на предприятии

С полученными водными растворами проведен визуальный эксперимент определения возможности данных веществ способствовать грануляции частиц серной пыли для обеспечения предотвращения дальнейшего пыления. Навески серы по 15 г рассыпались на бумаге, исследуемые растворы распылялись на образцы пыли с помощью пульверизатора в количестве около 3,6 г и перемешивались.

Фотографии серы до орошения, а также после орошения чистой водой представлены на рис.3 (1, 2).

На рис.3 (3-5, 9-11, 15-17) показаны образцы пыли после орошения водными растворами алкилполигликозидов, силиката натрия и крахмала. Проведенные наблюдения показывают, что наибольшей грануляции серы способствуют неионогенные ПАВ и раствор крахмала.

На рис.3 (6-8, 12-14, 18-20) представлены результаты визуального эксперимента по определению свойств грануляции исследуемых веществ спустя 1 ч после орошения. Видно, что грануляция частиц серы под воздействием растворов алкилполигликозидов и крахмала снижается, однако остается достаточно высокой по сравнению с раствором силиката натрия и чистой водой.

Помимо однокомпонентных водных растворов, были протестированы бинарные составы из смесей рассматриваемых веществ в следующих соотношениях, мас.%:

- состав А – алкилполигликозиды 1 %, силикат натрия 1 %;
- состав Б – алкилполигликозиды 1 %, крахмал 2,5 %;
- состав В – силикат натрия 1 %, крахмал 2,5 %.

Результаты представлены на рис.3 (21-26). Наибольший эффект грануляции показывают составы А и Б.

В бункере пылеподавления проведены испытания на определение эффективности орошения серы водой и различными веществами. Обработка серы средствами пылеподавления производилась поверхностью распылением пульверизатором. На сухой образец вносилось 1,8 г воды или водного раствора пылеподавителя. С каждым рассматриваемым реагентом была проведена серия из трех опытов, при которых измерение концентрации пылевых частиц производилось мгновенно. Кроме того, было проведено по три опыта с измерением концентрации пыли по истечении 20 мин.

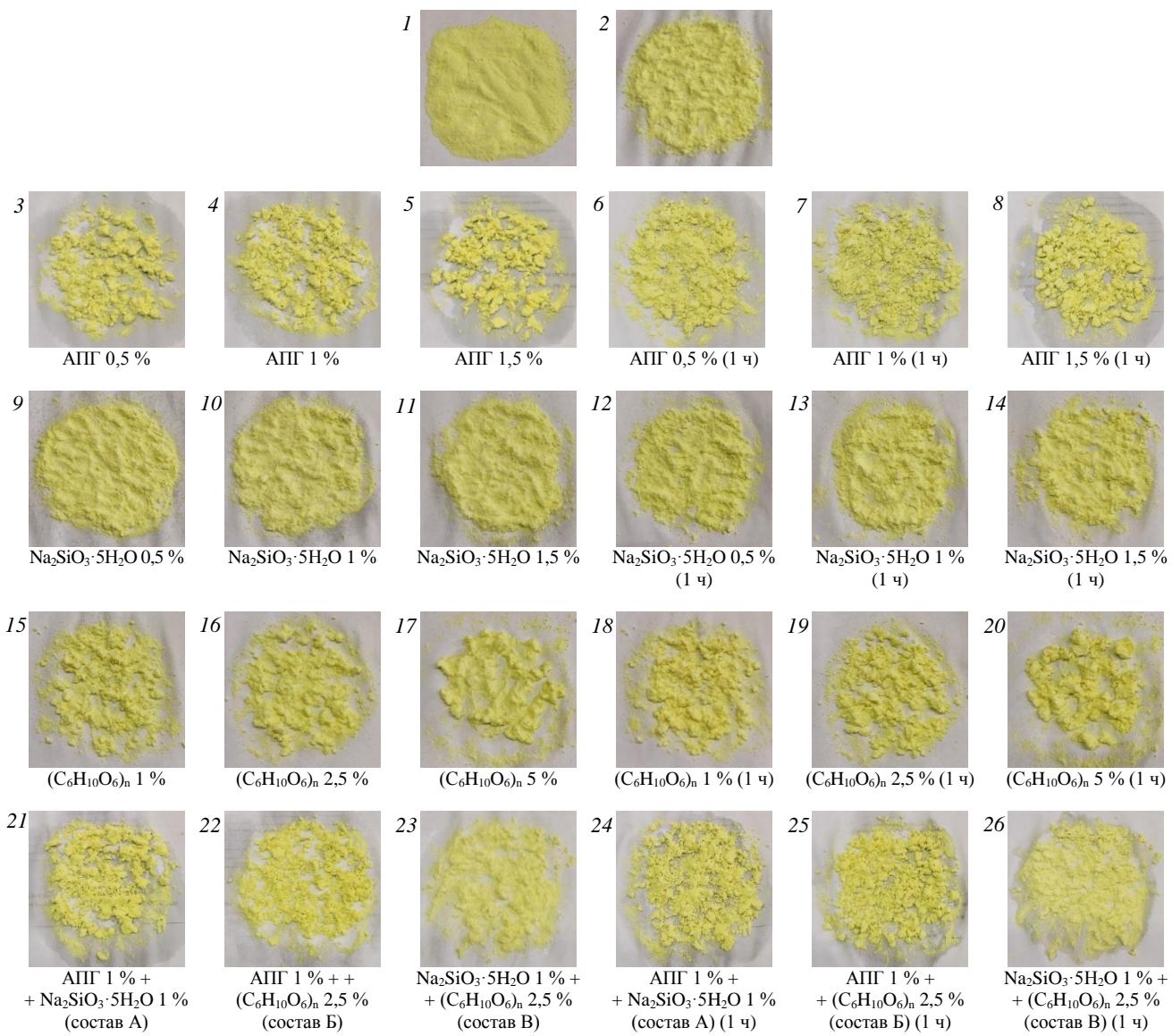


Рис.3. Визуальное определение грануляции образцов серы: 1 – без пылеподавления при воздушно-сухом состоянии; 2 – после орошения водой; 3 – при обработке водным 0,5 %-ным раствором алкилполигликозидов; 4 – 1 %-ным раствором; 5 – 1,5 %-ным раствором; 6 – 0,5 %-ным раствором спустя 1 ч; 7 – 1 %-ным раствором спустя 1 ч; 8 – 1,5 %-ным раствором спустя 1 ч; 9 – при обработке водным 0,5 %-ным раствором силиката натрия; 10 – 1 %-ным раствором; 11 – 1,5 %-ным раствором; 12 – 0,5 %-ным раствором спустя 1 ч; 13 – 1 %-ным раствором спустя 1 ч; 14 – 1,5 %-ным раствором спустя 1 ч; 15 – при обработке водным 1 %-ным раствором крахмала; 16 – 2,5 %-ным раствором; 17 – 5 %-ным раствором; 18 – 1 %-ным раствором спустя 1 ч; 19 – 2,5 %-ным раствором спустя 1 ч; 20 – 5 %-ным раствором спустя 1 ч; 21 – при обработке составом на водной основе с содержанием 1 % алкилполигликозидов и 1 % силиката натрия (состав А); 22 – составом с 1 % алкилполигликозидов и 2,5 % крахмала (состав Б); 23 – составом с 1 % силиката натрия и 2,5 % крахмала (состав Б); 24 – составом А спустя 1 ч; 25 – составом Б спустя 1 ч; 26 – составом В спустя 1 ч

Испытания в бункере пылеподавления проводились водными растворами следующих концентраций, мас.%: алкилполигликозиды – 1 %, силикат натрия – 1 %, крахмал – 2,5 %, составами А, Б и В.

Эффективность снижения пылевыделения оценивалась по формуле:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{C_{li}}{C_{0i}} \right)}{n},$$

где  $C_{0i}$  – концентрация без пылеподавления,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $C_{li}$  – концентрация при использовании средств пылеподавления,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $n$  – число измерений.

Графики зависимости концентраций пыли от времени показаны на рис.4. Результаты расчета эффективности пылеподавления представлены в табл.1.

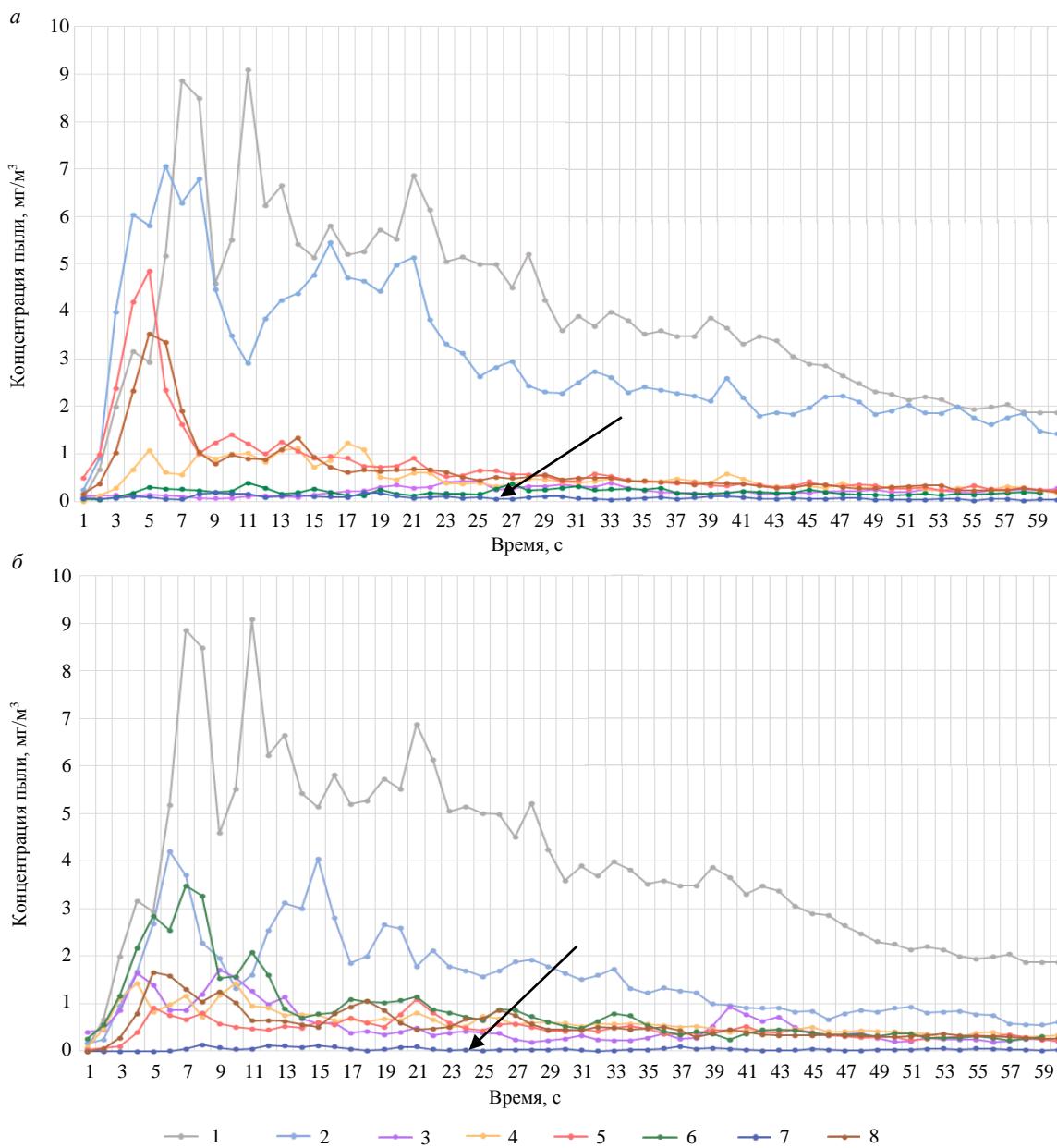


Рис.4. График зависимости общей концентрации частиц пыли от времени при мгновенном измерении (а) и спустя 20 мин (б) после орошения серы водой и другими веществами

1 – без пылеподавления; 2 – вода; 3 – алкилполигликозиды;

4 – силикат натрия; 5 – крахмал; 6 – состав А; 7 – состав Б; 8 – состав В

Таблица I

**Результаты измерения концентрации пыли при использовании различных средств пылеподавления**

Средство пылеподавления	Средняя концентрация в момент времени, мг/м <sup>3</sup>				Температура воздуха, °C	Влажность воздуха, %	Средняя эффективность пылеподавления, %
	10 с	30 с	75 с	120 с			
Без пылеподавления	9,085	3,594	1,409	0,557	18,1	29	–
Вода	3,487	2,273	1,226	0,471	17,9	31	30,5
Вода спустя 20 мин	1,322	1,648	0,529	0,124	18,4	33	64,4
Алкилполигликозиды	0,075	0,357	0,198	0,124	18,0	28	87,4
Алкилполигликозиды спустя 20 мин	1,548	0,268	0,148	0,083	17,7	25	86,2
Силикат натрия	0,999	0,999	0,213	0,099	18,0	28	86,2
Силикат натрия спустя 20 мин	1,432	0,590	0,217	0,077	18,4	28	83,6
Крахмал	1,402	0,420	0,206	0,061	17,5	26	83,9



Окончание табл.1

Средство пылеподавления	Средняя концентрация в момент времени, мг/м <sup>3</sup>				Температура воздуха, °C	Влажность воздуха, %	Средняя эффективность пылеподавления, %
	10 с	30 с	75 с	120 с			
Крахмал спустя 20 мин	0,515	0,425	0,142	0,059	17,5	26	87,3
Состав А	0,207	0,282	0,087	0,029	18,0	28	93,2
Состав А спустя 20 мин	1,575	0,525	0,196	0,083	18,0	28	82,6
Состав Б	0,165	0,100	0,021	0,023	17,5	28	97,5
Состав Б спустя 20 мин	0,039	0,044	0,013	0,006	17,5	28	98,9
Состав В	0,979	0,457	0,196	0,062	17,7	33	85,0
Состав В спустя 20 мин	1,024	0,452	0,149	0,061	17,7	33	86,6

Полученные результаты показывают, что наиболее эффективен состав Б, представляющий собой смесь алкилполигликозидов и крахмала. Эффективность пылеподавления составляет 97,5 % при мгновенном измерении и достигает 98,9 % по истечении 20 мин, что говорит о снижении возможности повторного пыления материала.

Для уточнения концентраций компонентов разрабатываемого состава были проведены дополнительные опыты по оценке эффективности пылеподавления состава на основе неионогенных ПАВ и крахмала со следующими соотношениями компонентов, мас.%:

- состав 1 – алкилполигликозиды 0,5 %, крахмал 2,5 %;
- состав 2 – алкилполигликозиды 1,5 %, крахмал 1 %;
- состав 3 – алкилполигликозиды 1,5 %, крахмал 2,5 %;
- состав 4 – алкилполигликозиды 0,5 %, крахмал 1 %;
- состав 5 – алкилполигликозиды 1 %, крахмал 1 %;
- состав 6 – алкилполигликозиды 1 %, крахмал 2,5 %.

Использование крахмала в концентрации 5 % было исключено по результатам визуального эксперимента определения грануляции из-за высокого содержания рассматриваемого вещества и возможности его отрицательного влияния на физико-химические свойства продукции.

Измерение концентраций пыли для всех опытов проводилось при температуре 19,6 °C и влажности воздуха 41 %. Результаты расчета эффективности пылеподавления при использовании различных составов алкилполигликозидов и крахмала представлены в табл.2. Графики зависимости концентраций серной пыли от времени изображены на рис.5.

Проведенные эксперименты показывают, что наибольшую эффективность пылеподавления серы предлагаемый состав достигает при следующем содержании компонентов в водном растворе: смесь олигомеров C12-14- алкилполигликозидов – 1-1,5; крахмал растворимый – 1-2,5 мас.%.

Таблица 2

## Результаты измерения концентрации пыли при использовании различных составов алкилполигликозидов и крахмала

Средство пылеподавления	Средняя концентрация в момент времени, мг/м <sup>3</sup>				Средняя эффективность пылеподавления, %	Эффективность по сравнению с водой, %
	10 с	30 с	75 с	120 с		
Состав 1	2,211	1,212	0,383	0,131	86,5	68,2
Состав 1 спустя 20 мин	0,142	0,045	0,023	0,012	97,1	96,8
Состав 2	0,056	0,021	0,024	0,004	98,1	97,2
Состав 2 спустя 20 мин	0,124	0,019	0,013	0,009	99,7	96,1
Состав 3	0,019	0,023	0,002	0,003	98,3	98,6
Состав 3 спустя 20 мин	0,008	0,013	0,001	0,005	99,7	99,3
Состав 4	2,707	1,290	0,436	0,165	66,3	56,5
Состав 4 спустя 20 мин	2,219	1,492	0,380	0,177	63,2	38,2
Состав 5	0,385	0,366	0,184	0,029	88,3	86,7
Состав 5 спустя 20 мин	1,353	0,651	0,288	0,062	81,5	64,8
Состав 6	0,165	0,100	0,021	0,023	97,1	97,2
Состав 6 спустя 20 мин	0,039	0,044	0,013	0,006	98,9	97,1

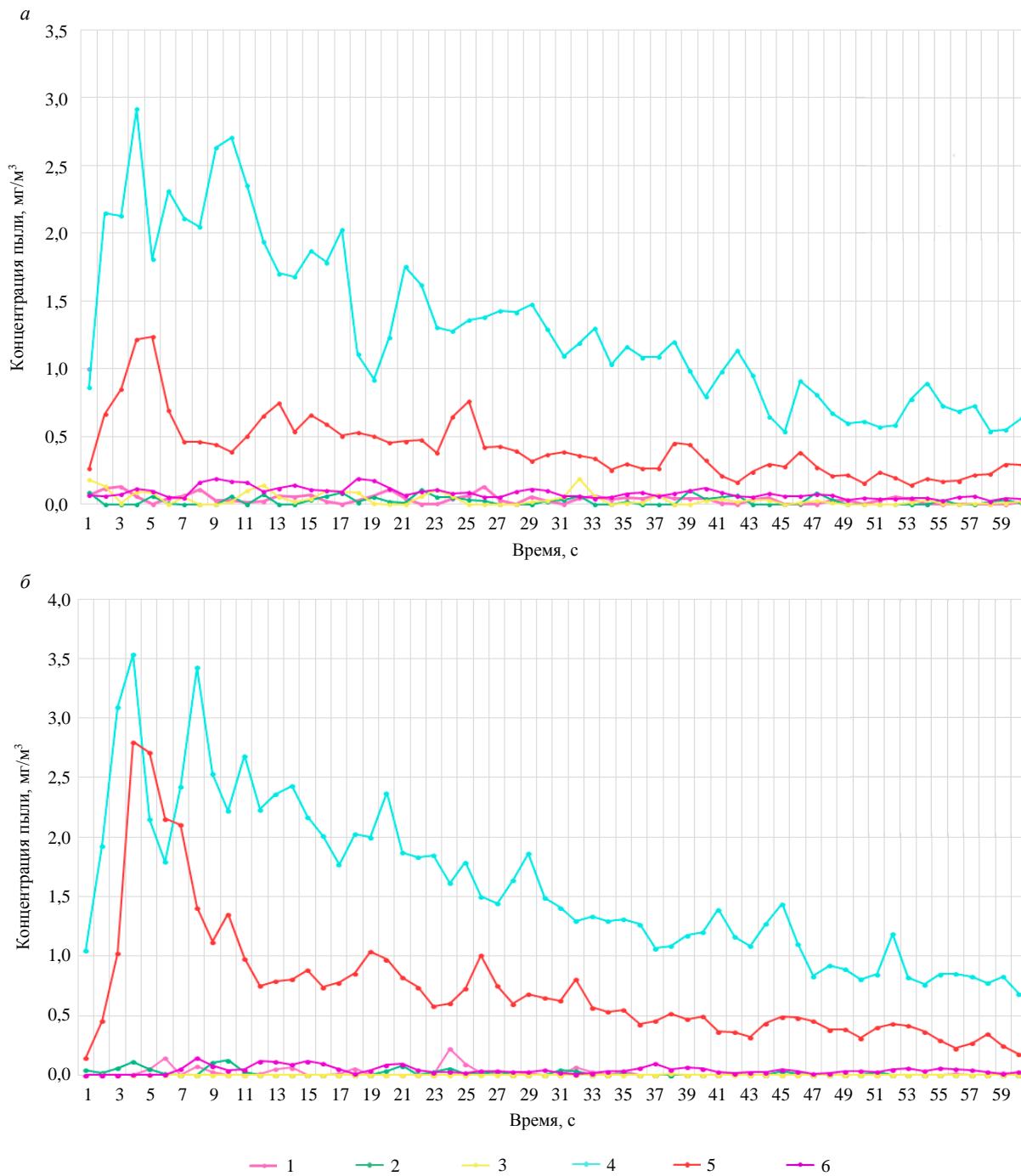


Рис.5. Графики зависимости общей концентрации частиц пыли от времени при мгновенном измерении (a) и через 20 мин (б) после орошения серы испытуемыми составами 1-6

Предлагаемый состав может применяться в существующих системах водоаэрозольного пылеподавления на объектах транспортирования серы. В морских портах и железнодорожных терминалах первой перевалочной операцией является перегрузка серы из полувагона на конвейерную ленту посредством вагоноопрокидательного устройства, размещенного в изолированном помещении. Как правило, на этом этапе перевалки реализована первая стадия системы пылеподавления – сеть форсунок, ориентированных на фронт пересыпа. Повторное пылеподавление (последующие стадии) производится сетями форсунок в закрытых бункерах пересыпа между участками конвейеров. Эксплуатация подобной системы с применением предлагаемого состава позволит обеспечить грануляцию для снижения пылевыделения при всех дальнейших операциях по перевалке серы, обеспечивается это двумя способами: увлажнением, коагуляцией, осаждением взметанной серной



пыли в воздухе и увлажнением поверхности транспортируемой серы с содержанием пылящих фракций. Предлагаемый состав может быть использован при распылении разными типами форсунок, а условия, создаваемые в бункере пылеподавления БПП 001, подобны условиям, создаваемым в изолированных помещениях и закрытых бункерах пересыпа.

### Заключение

Экспериментальная оценка эффективности различных способов пылеподавления, проведенная в лабораториях Санкт-Петербургского горного университета, позволила установить, что применение чистой воды в качестве рабочей среды процесса пылеподавления на объектах обращения гранулированной серы действительно показывает низкую эффективность (30,5 %), что может приводить к загрязнению территорий серной пылью, образующейся в результате перегрузки.

Как известно, сера гидрофобна, т.е. не смачивается водой. Молекулы ПАВ, имея дифильную природу, адсорбируются на поверхности раздела вода – сера, что приводит к уменьшению поверхностного натяжения воды. Неионогенные ПАВ, представленные алкилполигликозидами, добавляемые в воду для увеличения смачиваемости обрабатываемого материала, отличаются не только высокой эффективностью, но и хорошей биоразлагаемостью. Алкилполигликозиды характеризуются наибольшей эмульгирующей способностью среди промышленных ПАВ, что эффективно влияет на снижение их расхода при использовании в качестве рабочей среды для пылеподавления [35, 36].

Полисахариды являются одним из самых доступных и дешевых ресурсов, запасы которых непрерывно пополняются за счет фотосинтеза в растениях. Крахмал – это высокомолекулярное органическое соединение, представленное смесью амилозы и амилопектина. Макромолекулы крахмала представляют собой вытянутые и разветвленные цепи, состоящие из D-глюкозных остатков в амилозе, связанных между собой гликозидными связями. Кроме углеводов, крахмал содержит некоторое количество жирных кислот, которые определяют его способность образовывать ряд сложных и простых эфиров [37].

Крахмальные гидрогели (клейстеры) широко применяются в различных отраслях промышленности. Известны исследования [38], подтверждающие способность амилозы в составе крахмала образовывать нестехиометрические соединения со спиртами и другими углеводородами. Причиной устойчивого загущения и увеличения вязкости крахмальных гидрогелей является образование комплексов между амилозой крахмала и высокоподвижными молекулами ПАВ.

Для пылеподавления на объектах обращения с гранулированной серой предлагается использовать состав на основе неионогенных ПАВ, представленных смесью олигомеров C12-14-алкилгликозидов, дополнительно содержащий смесь полисахаридов амилозы и амилопектина в виде крахмала растворимого и воды в следующем соотношении компонентов, мас. %: смесь олигомеров C12-14-алкилполигликозидов – 1-1,5; крахмал растворимый – 1-2,5.

Предлагаемый пылеподавитель высокодисперсной серы показал стабильно высокую эффективность пылеподавления как при измерении непосредственно сразу после орошения (98,3 %), так и по истечении выжидаемого времени (99,7 %). Разработанный состав обеспечивает повышение пылеподавляющей способности раствора и исключение возможности повторного пыления за счет образования на поверхности полимерной пленки, а также повторной грануляции измельченного истиранием продукта. Обработка данным пылеподавителем высокодисперсной серы гарантирует эффективное снижение поверхностного натяжения воды при таких концентрациях используемых компонентов, которые позволяют исключить отрицательное влияние на другие физико-химические свойства готовой продукции, такие как сыпучесть, гигроскопичность и слеживаемость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Saleh T.A. Characterization, determination and elimination technologies for sulfur from petroleum: Toward cleaner fuel and a safe environment // Trends in Environmental Analytical Chemistry. 2020. Vol. 25. № e00080. DOI: [10.1016/j.teac.2020.e00080](https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00080)
2. Rongrong Yang, Zhirong Wang, Juncheng Jiang et al. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 108. № 104342. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2019.104342](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104342)
3. Naiyan Zhang, Zhi Zhang, Zhenhua Rui et al. Comprehensive risk assessment of high sulfur-containing gas well // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 170. P. 888-897. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.07.016](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.016)
4. Shakharanova T., Sobianina D., Karapetyan K. Development of a dissolution model of a vitreous phosphorus-containing fertilizer concerning interdiffusion applied for calculation of fertilizer doses // Research on Crops. 2021. Vol. 22. Iss. 2. P. 279-284. DOI: [10.31830/2348-7542.2021.069](https://doi.org/10.31830/2348-7542.2021.069)



5. Камешков А.В., Кондрашева Н.К., Габдулхаков Р.Р., Рудко В.А. Сравнительная характеристика нефтяных коксующих добавок из различных видов нефтяного сырья // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 35-42. DOI: [10.17580/tsm.2020.10.05](https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.05)
6. Родионов В.А., Карпов Г.Н., Лейсле А.В. Методологический подход к оценке взрывопожароопасных свойств сульфидсодержащих полиметаллических руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 198-213. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_198](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_198)
7. Dvoynikov M.V., Nutskova M.V., Blinov P.A. Developments Made in the Field of Drilling Fluids by Saint Petersburg Mining University // International Journal of Engineering. 2020. Vol. 33. Iss. 4. P. 702-711. DOI: [10.5829/IJE.2020.33.04A.22](https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.04A.22)
8. Ковалевский В.Н., Мысин А.В. Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 20-34. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_1\\_0\\_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_20)
9. Zhukovskiy Y.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: [10.3390/en14175268](https://doi.org/10.3390/en14175268)
10. Boikov A., Savelev R., Payor V., Potapov A. Universal Approach for DEM Parameters Calibration of Bulk Materials // Symmetry. 2021. Vol. 13. Iss. 6. № 1088. DOI: [10.3390/sym13061088](https://doi.org/10.3390/sym13061088)
11. Кантюков Р.Р., Затевалов Д.Н., Ваганов Р.К. Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 578-586. DOI: [10.31897/PMI.2021.4.11](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.11)
12. Хужакулов А.Х. Использование серы в сельском хозяйстве Узбекистана и обучение требованиям безопасности // Проблемы науки. 2021. № 6 (65). С. 96-102. DOI: [10.24411/2413-2101-2021-10601](https://doi.org/10.24411/2413-2101-2021-10601)
13. Ivanov A.V., Smirnov Y.D., Lisay V.V., Borowski G. Issues of the Impact of Granulated Sulfur Transportation on the Environmental Components // Journal of Ecological Engineering. 2023. Vol. 24. Iss. 6. P. 86-97. DOI: [10.12911/22998993/162558](https://doi.org/10.12911/22998993/162558)
14. Bazhin V., Masko O. Monitoring of the Behaviour and State of Nanoscale Particles in a Gas Cleaning System of an Ore-Thermal Furnace // Symmetry. 2022. Vol. 14. Iss. 5. № 923. DOI: [10.3390/sym14050923](https://doi.org/10.3390/sym14050923)
15. Зырянова О.В., Киреева Е.В., Абрамова А.Е. Разработка пылеподавительных составов для обеспечения экологической безопасности при ведении горных работ открытым способом // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 10. С. 22-28. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-10-22-28](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-22-28)
16. Cong Zhang, Shuo Yuan, Ningning Zhang et al. Dust-suppression and cooling effects of spray system installed between hydraulic supports in fully mechanized coal-mining face // Building and Environment. 2021. Vol. 204. № 108106. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108106](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108106)
17. Qun Zhou, Botao Qin. Coal dust suppression based on water mediums: A review of technologies and influencing factors // Fuel. 2021. Vol. 302. № 121196. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.121196](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121196)
18. Chaohang Xu, Hetang Wang, Deming Wang et al. Improvement of Foaming Ability of Surfactant Solutions by Water-Soluble Polymers: Experiment and Molecular Dynamics Simulation // Polymers. 2020. Vol. 12. Iss. 3. № 571. DOI: [10.3390/polym12030571](https://doi.org/10.3390/polym12030571)
19. Hetang Wang, Xiaobin Wei, Yunhe Du, Deming Wang. Effect of water-soluble polymers on the performance of dust-suppression foams: Wettability, surface viscosity and stability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. Vol. 568. P. 92-98. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2019.01.062](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.01.062)
20. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 71-81. DOI: [10.31897/PMI.2022.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12)
21. Guang Xu, Yingping Chen, Jacques Eksteen, Jialin Xu. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 639. P. 1060-1076. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.05.182](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.182)
22. Xiaobin Wei, Hetang Wang, Ying Xie, Yunhe Du. An experimental investigation on the effect of carboxymethyl cellulose on morphological characteristics of dust-suppression foam and its mechanism exploration // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 135. P. 126-134. DOI: [10.1016/j.psep.2019.12.009](https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.009)
23. Zidong Zhao, Ping Chang, Guang Xu et al. Comparison of the coal dust suppression performance of surfactants using static test and dynamic test // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 328. № 129633. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.129633](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129633)
24. Ping Chang, Zidong Zhao, Guang Xu et al. Evaluation of the coal dust suppression efficiency of different surfactants: A factorial experiment // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2020. Vol. 595. № 124686. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2020.124686](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124686)
25. Yen-Yi Lee, Chung-Shin Yuan, Po-Hsuan Yen et al. Suppression Efficiency for Dust from an Iron Ore Pile Using a Conventional Sprinkler and a Water Mist Generator // Aerosol and Air Quality Research. 2022. Vol. 22. Iss. 2. № 210320. DOI: [10.4209/aaqr.210320](https://doi.org/10.4209/aaqr.210320)
26. Huitian Peng, Wen Nie, Peng Cai et al. Development of a novel wind-assisted centralized spraying dedusting device for dust suppression in a fully mechanized mining face // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. Iss. 4. P. 3292-3307. DOI: [10.1007/s11356-018-3264-8](https://doi.org/10.1007/s11356-018-3264-8)
27. Friesen D.E., Radok A. Patent № CA 2640857 A1. Methods and compositions for coating sulfur blocks. Publ. 10.04.2009.
28. Weagle G., Horvath T. Patent № CA 2645851 A1. Method and composition to form a flexible crust on a substrate. Publ. 04.06.2010.
29. Кацубин А.В., Ковицов С.В., Ильяшенко И.С., Маринина В.М. Исследование органических составов для снижения аэробиогенной нагрузки от автомобильных дорог угольных разрезов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 63-67. DOI: [10.24000/0409-2961-2020-1-63-67](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-1-63-67)
30. Winstanley R.A., Swartzlander M.W., Cooke T.W. Patent № US 5223165 A. Use of alkyl glycosides for dust suppression. Publ. 29.06.1993.
31. van der Galiën M. Patent № NL 2011049 C2. Dust-suppressing composition and method there for. Publ. 05.01.2015.
32. Beeksma W.J. Patent № NL 1027690 C2. Antidusting composition for treating dust-producing materials comprises alkyl glucoside, nonionic surfactant and water. Publ. 01.08.2006.
33. Корнева М.В. Разработка и обоснование мероприятий по снижению концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле угольных шахт: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. 20 с.



34. Иванов А.В., Смирнов Ю.Д., Чупин С.А. Разработка концепции инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 757-766. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.15
35. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинова И.И., Куличкова С.И. К вопросу об экотоксичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных ПАВ, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 98-106. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106
36. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 4. С. 169-179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013
37. Можейко Ф.Ф., Шевчук В.В., Поткина Т.Н., Войтенко А.И. Применение неионогенных ПАВ в смеси с солями многовалентных металлов при флотации сильвинитовых руд // Известия Национальной академии наук Беларусь. Серия химических наук. 2014. № 1. С. 113-117.
38. Юсова А.А., Липатова И.М., Морыганов А.П. Влияние ПАВ на состояние крахмальных гидрогелей в условиях воздействия высоких напряжений сдвига // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. № 3. С. 449-453.

**Авторы:** В.В.Лисай, специалист по охране труда и экологии, <https://orcid.org/0000-0002-8164-0119> (ООО «Стивидорно-судоходная компания», Санкт-Петербург, Россия), Ю.Д.Смирнов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2631-6674> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), А.В.Иванов, канд. техн. наук, доцент, ivanov\_av4@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1045-5052> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Г.Боровски, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-6971-5395> (Люблинский технический университет, Люблин, Польша).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.