



УДК 665.617

Разработка новых составов для борьбы с пылеобразованием в горнодобывающей и горнотранспортной промышленности

Н.К.КОНДРАШЕВА, Е.В.КИРЕЕВА, О.В.ЗЫРЯНОВА✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Кондрашева Н.К. Разработка новых составов для борьбы с пылеобразованием в горнодобывающей и горнотранспортной промышленности / Н.К.Кондрашева, Е.В.Киреева, О.В.Зырянова // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 272-280. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.11

Аннотация. Борьба с пылеобразованием в летний и зимний периоды является актуальной при ведении открытых горных работ, но в условиях отрицательных температур к пылеподавляющим средствам предъявляются дополнительные требования. Предлагаются профилактические составы, в которых в качестве базовых компонентов используются легкие и тяжелые газойли каталитического крекинга и замедленного коксования. Вовлечение тяжелых фракций позволяет повысить температуру вспышки, тем самым снизив пожароопасность пылеподавателя, улучшить его адгезионные свойства за счет повышения содержания полиароматических углеводородов, снизить себестоимость готового продукта. С целью улучшения низкотемпературных и адсорбционных свойств разрабатываемых пылеподавляющих средств в их состав включены тяжелые нефтяные остатки (крекинг-остаток и гудрон) в различных концентрациях: 2-10 % по массе. Разработаны альтернативные составы пылеподавателей, которые получали путем эмульгирования винилированного алкидного олигомера в воде, изучена способность данной дисперсии формировать на пылящих поверхностях прочные пленки. Показана эффективность применения водного раствора винилалкидного олигомера летом в качестве пылеподавляющего средства. Результатами данного исследования является разработка новых профилактических составов с улучшенными низкотемпературными свойствами и подтверждение теоретической части исследования результатами испытаний эксплуатационных характеристик на лабораторной установке.

Ключевые слова: открытая горная разработка; пылеобразование; пылеподавляющие средства; растительные полимеры; нефтепродукты; тяжелые нефтяные остатки

Введение. Данная работа посвящена вопросам развития технологии горного дела, безопасности ведения горных работ в экстремальных условиях отрицательных температур, где работы должны соответствовать высоким экологическим стандартам. В России доля открытого способа разработки полезных ископаемых, в частности рудных месторождений, в общей добыче составляет около 70 %. Развитие горнодобывающей промышленности сопровождается увеличением глубины разработки до 400 (в перспективе 450-600) м, усложнением процесса проветривания карьерного пространства, ухудшением условий труда по газовому и пылевому фактору [7]. Некоторые разработки и новое понимание экологических проблем и стратегии глубокой добычи для более чистого производства на шахтах приведены в работе [14].

Угольная промышленность в России развивается и наращивает темпы добычи, к 2030 г. планируется получить 410 млн т угля [9, 13]. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Нерюнгринского и Сыллахского месторождений Дальневосточного федерального округа Республики Саха (Якутия) показал, что на долю республики приходится 47 % разведанных запасов угля Восточной Сибири и Дальнего Востока [1], при этом освоено или осваивается не более 7 % [11]. Производство угля представительства компании Tigers Realm Coal Limited в России (Бериговский угольный бассейн) за год увеличилось на 131 % и составило 576 тыс. т [2].

Несмотря на востребованность угля и продуктов его переработки, существуют нерешенные проблемы при работе с ним. Добыча более 1000 т приводит к освобождению более 100 м³ отходов обогащения, представляющих угрозу здоровью людей вследствие образования технической пыли. Наибольшее число выбросов вредных примесей приходится на долю буровзрывных работ – около 35, погрузочно-транспортных работ – 40 %, большое количество пыли скапливается на карьерных площадях [3, 10].



Мельчайшие частицы пыли приводят к существенному загрязнению атмосферы карьеров и прилегающих к ним районов [10]. Пыль представляет собой серьезную угрозу безопасности и здоровью рабочих при ведении открытых горных работ и подземном прокладывании туннелей, где рекомендованы высокоэкологичные составы [14]. Основные причины, приводящие к заболеваниям, связаны с уровнем концентрации пыли и ее дисперсностью, периодичностью вдыхания, а также содержанием в ней свободного диоксида кремния, наличием адсорбированных газов (оксидов углерода и азота, альдегидов и других) на поверхности пыли [10].

Постановка проблемы. Суровый климат России (Кемерово, Кузбасс), низкие отрицательные температуры являются естественными для открытых разработок, и решение вопроса борьбы с пылеобразованием при низких температурах является весьма актуальным. В работе предложено снизить температуру застывания готового профилактического средства введением депрессорных добавок, таких как крекинг-остаток и гудрон. Механизм снижения температуры застывания обусловлен способностью смолисто-асфальтовых соединений адсорбироваться на твердых поверхностях кристаллов парафинов, которые участвуют в снижении температуры застывания [14]. Дифференциальная сканирующая калориметрия исследования морфологии кристаллов парафина показала, что кристаллы парафинов нефтяной дисперсной системы являются основными участниками депрессорного эффекта при добавлении любого депрессора: тяжелых нефтяных остатков или полиметилметакрилата [14]. Изучение горнодобывающей промышленности Китая, работ китайских и японских исследователей [15-18, 21, 24] показало, что проблема борьбы с пылью актуальна и для этих стран. Для эффективного повышения способности воды подавлять угольную пыль при использовании в угольной шахте в г. Эрдосе (Китай) была предложена рецептура поверхностно-активных веществ (ПАВ) и исследован механизм синергии между ними [23]. Полевые испытания показали, что эффективность пылеподавления раствором, содержащим по 0,025 % по массе ПАВ первого и второго типа, была больше 87 %, что значительно выше результата применения воды, и эффективно снизило концентрацию пыли в полностью механизированном угольном забое 2104 угольной шахты в г. Эрдосе (Китай) [23]. Данный опыт подтверждает целесообразность разработки экологичных водных составов на основе растительных полимеров.

Целью работы является разработка профилактических средств (ПС) на основе нефтепродуктов с добавлением тяжелых нефтяных остатков для улучшения низкотемпературных свойств ПС и их способности к пылеподавлению в зимний период, а также вовлечение растительных полимеров в качестве альтернативной сырьевой базы для получения летних пылеподавляющих составов [6]. Летние составы на основе водных дисперсий являются высокоэкологичными и эффективными, в работе [20] авторы исследуют жидкие смазочные материалы на водной основе, которые могут действовать как эмульгаторы в присутствии даже небольшого количества масла. Исследование возможности получения водных дисперсий на основе растительных полимеров для разработки профилактических средств является перспективным.

Методология. Были проведены сравнительные испытания профилактических средств на водной и органической (нефтяной) основе. ПС на органической основе состоят из базовых компонентов, таких как легкий (ЛГКК) и тяжелый (ТГКК) газойли каталитического крекинга, а также легкий (ЛГЗК) и тяжелый (ТГЗК) газойли замедленного коксования и их смеси в соотношении 1:1 [22]. В качестве добавок, улучшающих низкотемпературные свойства ПС, применялись крекинг-остаток (КО) и гудрон (Г), которые обладают хорошими адгезионными свойствами, влияющими на эксплуатационные характеристики готового продукта [5]. Средство должно прочно удерживаться на минеральной (обрабатываемой) поверхности в виде тонкой полимолекулярной пленки, препятствуя отрыву пылевой частицы от обработанного участка. ПС на водной основе получено эмульгированием винилированного алкидного олигомера (ВАО) в воде.

Результаты испытаний пылеподавляющих составов приведены в табл. 1. Все методики проведения испытаний описаны в работе [22].

Из табл. 1 видно, что по основным технологическим показателям водные ПС показывают лучшие результаты в сравнении с органическими прежде всего по противопожарным (температура вспышки) и экологическим (содержание органических веществ) характеристикам. Но применение таких ВАО в зимний период невозможно, так как его морозоустойчивость крайне низкая (температура замерзания 0 °С).



Таблица 1

Физические свойства пылеподавляющих составов

Наименование показателя	ВАО	ПС на органической основе			
		ЛГКК:ТГКК		ЛГЗК:ТГЗК	
		5 % КО	5 % Г	5 % Г	5 % КО
Температура замерзания, °С	0	- 52	- 48	- 53	- 46
Температура вспышки, °С	-	100	80	79	83
Условная вязкость по вискозиметру типа ВЗ-246, °ВУ	10-20	13,5	12,5	13,7	14
Содержание органических веществ, %	3-5	100	100	100	100

Метод оценки стойкости предлагаемых профилактических составов. Для оценки стойкости предлагаемых профилактических составов к ветряной эрозии была сконструирована камера для моделирования реального процесса пылеобразования на карьере (рис.1). Камера состояла из емкости с образцом грунта и циклоном, имитирующим ветер. Циклон герметично подключался к камере с образцами. Эффективность пылеподавления оценивалась путем измерения массы пылевых частиц, которые циклон отрывал от поверхности, обработанной разными профилактическими составами.

В качестве пылящего материала анализу подверглись образцы песка, угля и уррита. Уррит был необходим для проверки способности профилактических составов предотвращать пыление мелкодисперсных материалов.

Метод оценки пылесвязывающих свойств ПС. Исследование пылесвязывающих свойств ПС производилось методом, основанным на виброперемешивании пыли с ПС и дальнейшем определении его ситового состава, что имитирует разрушение покрытия автодорог.

Ситовой анализ определяется следующим образом: пыль определенной фракции ($d = 0,15-0,08$ мм) в количестве 50 г смешивается с пылесвязывающим веществом в количестве, соответствующем норме расхода $1 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ дорожного полотна. Пыль перемешивается с ПС в течение 5 мин. Затем навеска просеивается через набор сит с диаметром ячеек 1; 0,3; 0,2; 0,15; 0,08 мм [12].

Количество образовавшейся фракции более 1 мм (% по массе) является мерой пылесвязывающих свойств ПС [12].

Обсуждение. Разработаны ПС на базе газойлевых фракций каталитического крекинга с пределами выкипания 200-340 и 320-470 °С и замедленного коксования с пределами выкипания 220-359 и 340-480 °С. Легкий и тяжелый газойли смешивались в соотношении 1:1, затем в эту базовую смесь вводили подогретый до температуры 50-70 °С крекинг-остаток или гудрон в количестве от 2 % по массе, после чего смесь перемешивали до получения однородной массы.

Физико-химические свойства разработанных составов профилактических средств представлены в работе [22]. Профилактические составы с вовлечением тяжелых нефтяных остатков, таких как крекинг-остаток и гудрон, в концентрации 2-10 % по массе отвечают требованиям современных технических условий на существующие профилактические составы: ТУ 38.1011322, ТУ 38.1011142, ТУ 0258-001-48899100-2004, ТУ 0258-020-38519207-2012. Вовлечение тяжелого нефтяного остатка загущает систему по таким параметрам как вязкость и плотность, однако в пределах допустимых значений ТУ, с 2,68 до 3,12 мм²/с [22]. Повышение вязкости способствует снижению расхода профилактического средства при его нанесении. Температура вспышки при вовлечении тяжелых фракций

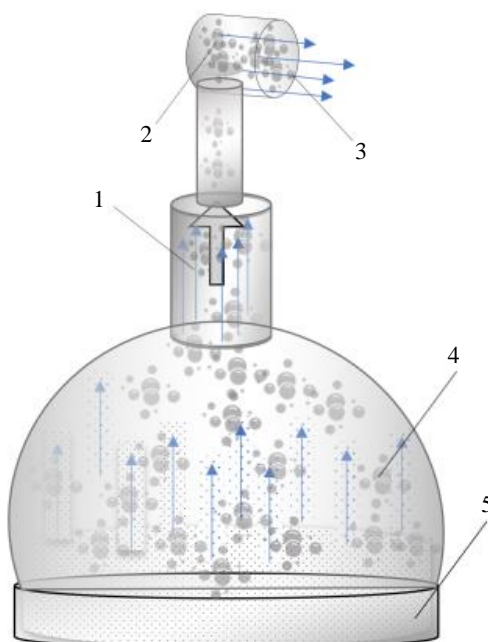


Рис.1. Установка

для измерения уноса пыли

1 – рукав с потоком унесенных частиц;

2 – сборник пылевых частиц;

3 – поток унесенных частиц; 4 – сфера, в которой циклон моделирует ветровой унос;

5 – емкость с исследуемым пылящим материалом



газойлей замедленного коксования, каталитического крекинга и тяжелых нефтяных остатков возрастает с 82 до 103 °С, что позволяет снижать пожароопасные свойства профилактического средства. Температура застывания снижается в составах с –45 до –50 °С для смесей на основе газойлей каталитического крекинга, для составов на основе газойлей замедленного коксования температура застывания снижается с –35 до –46 °С [22].

Установлено, что механизм действия тяжелых нефтяных остатков (ТНО) как депрессорных присадок в смесях ПС объединен с механизмом снижения поверхностного натяжения (ПН) на границе раздела фаз «жидкость – твердое тело», показатели ПН и температуры застывания (ТЗ) зависят от концентрации активных компонентов ТНО и вязкости нефтяных дисперсных систем (НДС), поэтому необходимо сравнить все кривые зависимости ПН и температуры застывания от концентрации ТНО. Кривые зависимости ПН и ТЗ от концентрации ТНО в газойлевых фракциях ЛГКК:ТГКК и ЛГЗК:ТГЗК, взятых в соотношении 1:1, при температуре –10 °С приведены на рис.2.

При введении в базовые фракции тяжелых нефтяных остатков, благодаря некоторой поверхностной активности содержащихся в них смолисто-асфальтовых веществ (САВ), на поверхности растущих кристаллов твердых парафиновых углеводородов формируются адсорбционные слои, которые задерживают рост кристаллов и препятствуют созданию правильной кристаллической пространственной структуры. В результате контактного взаимодействия САВ с кристаллами твердых углеводородов происходит снижение прочности коагуляционных структур, а следовательно и температуры застывания смеси с 5 % по массе ТНО (точка Б на рис.2, а).

Введение в смесь ЛГКК:ТГКК крекинг-остатка в концентрации 5 % по массе снижает температуру застывания на 18 °С, с –35 до –53 °С. Гудрон в этой же дисперсионной среде при концентрации 5 % по массе снижает температуру застывания на 11 °С (рис.2). Для смесей ПС на базе ЛГКК:ТГКК оптимальной является концентрация 5 % по массе КО и Г. Депрессия ТЗ зависит от содержания в нефтяной фракции твердых парафиновых углеводородов; газойли каталитического крекинга содержат в два раза меньше твердых парафиновых углеводородов, чем смеси на базе ЛГЗК:ТГЗК. При превышении предельной концентрации крекинг-остатка в смеси коагуляционные связи между надмолекулярными структурами смеси газойлей каталитического крекинга с крекинг-остатком образуются во всем объеме системы. Для более глубокого изучения поверхностных свойств разрабатываемых ПС была изучена их смачивающая способность путем измерения значений краевого угла (КУ) на металлической пластине (рис.3).

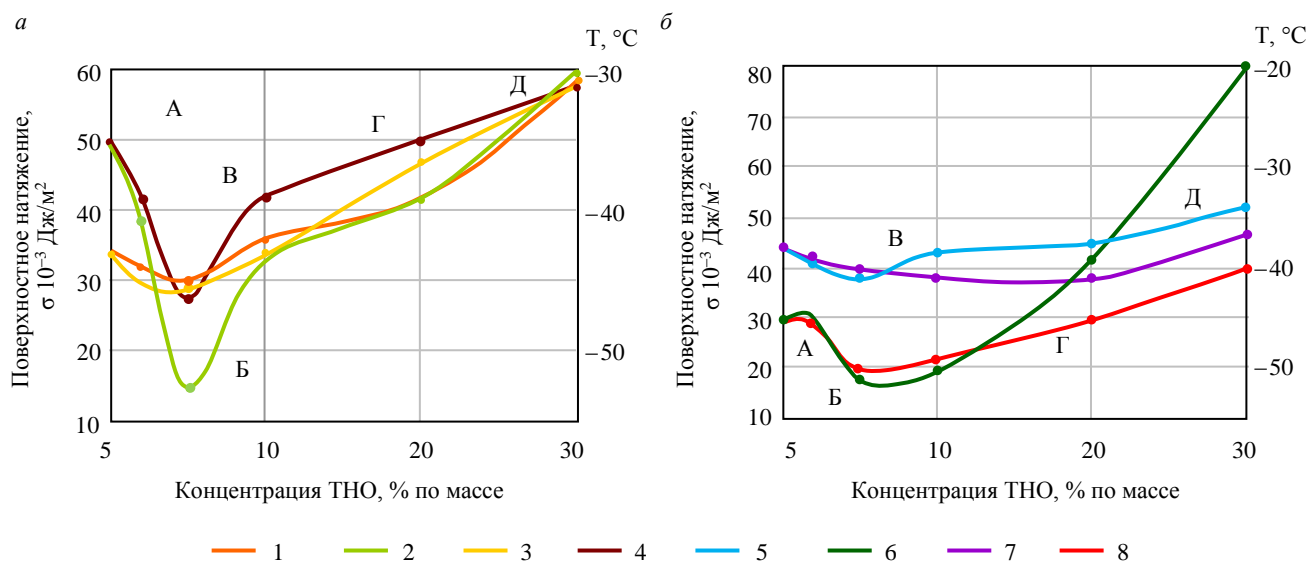


Рис.2. Зависимость поверхностного натяжения и температуры застывания смесей легких и тяжелых газойлей каталитического крекинга (а) и замедленного коксования (б) от содержания КО и Г, при температуре –10 °С
1 – ЛГКК:ТГКК+КО; 2 – ЛГКК:ТГКК+КО –ТЗ; 3 – ЛГКК:ТГКК+Г; 4 – ЛГКК:ТГКК+Г–ТЗ;
5 – ЛГЗК:ТГЗК+КО; 6 – ЛГЗК:ТГЗК+КО –ТЗ; 7 – ЛГЗК:ТГЗК+Г; 8 – ЛГЗК:ТГЗК+Г–ТЗ

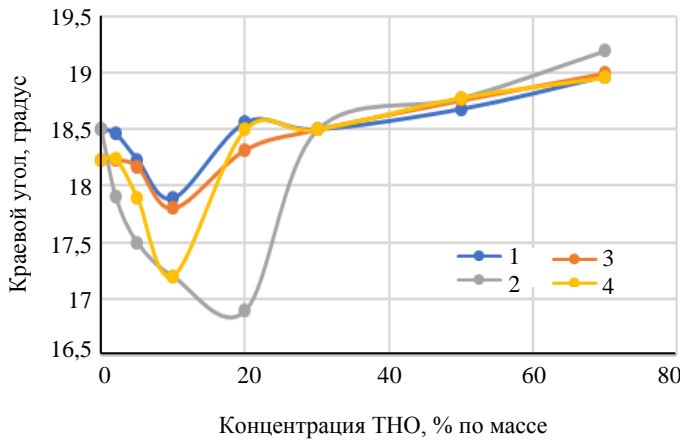


Рис.3. Зависимость изменения краевого угла ПС от концентрации ТНО

1 – ЛГКК:ТГКК+КО; 2 – ЛГКК:ТГКК+Г; 3 – ЛГЗК:ТГЗК+КО; 4 – ЛГЗК:ТГЗК+Г

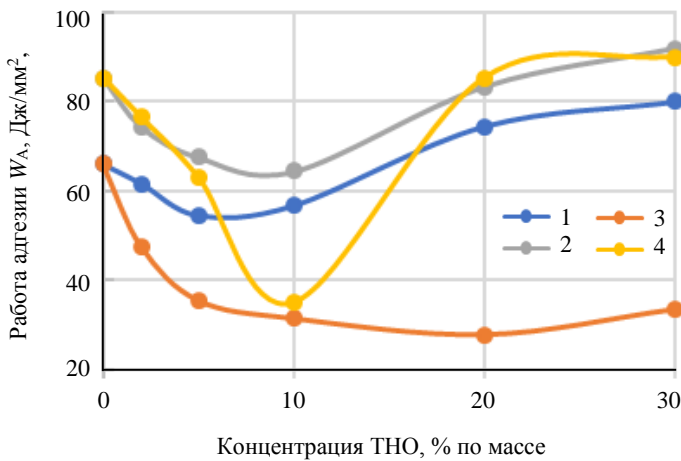


Рис.4. Зависимость изменения работы адгезии от концентрации ТНО в смесях ПС на базе ЛГКК:ТГКК и ЛГЗК:ТГЗК (1:1) при температуре -10 °С

1 – ЛГКК:ТГКК+КО; 2 – ЛГЗК:ТГЗК+КО; 3 – ЛГКК:ТГКК+Г; 4 – ЛГЗК:ТГЗК-Г

Краевой угол снижается при концентрации ТНО от 2 до 10 % по массе. Дальнейшее введение в состав ТНО приводит к загущению системы НДС, и значение КУ начинает возрастать. После анализа изменения поверхностного натяжения и краевого угла смачивания лабораторных образцов ПС от температуры окружающей среды была изучена зависимость работы адгезии от концентрации ТНО в смесях ПС как на базе ЛГКК:ТГКК, так и для ЛГЗК:ТГЗК при -10 °С, результаты приведены на рис.4.

При добавлении в состав ПС ТНО (как гудрона, так и крекинг-остатка) работа адгезии растет только после введения в состав ПС ТНО выше 10 % по массе за счет усиления межмолекулярного взаимодействия между САВ ТНО и поверхностью металла. При концентрации КО и Г 5 % по массе наблюдается снижение работы адгезии из-за уменьшения вязкости системы и депрессорного эффекта. Поверхностное натяжение и КУ смачивания изменяются экстремально (нелинейно), подтверждая гипотезу о протекании взаимно конкурирующих процессов адсорбции на границе раздела фаз «жидкость – твердое тело» и на твердой поверхности кристаллов твердых парафинов (только при отрицательных температурах). Гудрон в поле растворителя на базе смесей газойлей замедленного коксования показывает резкое снижение работы адгезии при его введении в количестве 10 % по массе, однако потом наблюдается увеличение ра-

боты адгезии, что связано с углеводородным составом газойлей замедленного коксования из-за высокого содержания смол (в два раза выше, чем у газойлей каталитического крекинга). Увеличение работы адгезии объясняется взаимодействием высоко конденсированных углеводородов ЛГЗК:ТГЗК с САВ гудрона и наблюдается активное загущение НДС. Полученные экстремальные зависимости подтверждают, что хорошими смачивающими свойствами обладают составы ЛГКК:ТГКК и ЛГЗК:ТГЗК в соотношении 1:1 с концентрацией КО и гудрона от 2 до 10 % по массе, однако лучшими свойствами обладают смеси с концентрацией 5 % по массе, что подтверждает приведенный график (рис.3).

Смазывающие свойства ПС оценивались путем замера среднего значения диаметра пятна износа (ДПИ) стальных шаров на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) по ГОСТ 9490-75.

Введение КО до 5 % по массе не улучшает смазывающие свойства базовых смесей газойлей замедленного коксования. При этом наблюдается увеличение ДПИ с 0,665 до 0,689 мм. Происходит увеличение размеров макромолекул САВ и уменьшение межмолекулярного взаимодействия элементов жидкости друг с другом и твердой поверхностью, что приводит к снижению прочности надмолекулярной структуры и уменьшению толщины пленки, а следовательно к ухудшению смазочной способности [22]. Высокое содержание крекинг-остатка в смеси негативно сказывается на других технических характеристиках составов, поэтому оптимальными составами являются составы с концентрацией КО 2-10 % по массе.



При добавлении гудрона в концентрации до 2 % по массе ДПИ уменьшается с 0,807 до 0,762 мм, а при повышении до 5 % опять увеличивается до 0,803 мм. При введении 2 % по массе КО улучшаются смазывающие свойства базовых смесей газойлей каталитического крекинга, уменьшается ДПИ с 0,807 до 0,685 мм ввиду того, что САВ КО, образующие на поверхности пар трения (стальных шаров) тонкую и неравномерную пленку, взаимодействуют между собой.

На основе этого анализа можно сделать вывод о том, что оптимальными составами с точки зрения низкотемпературных, поверхностных, адсорбционных, смачивающих и смазывающих свойств являются смеси, содержащие ЛГКК:ТГКК (1:1) с КО и Г 2-10 % по массе и ЛГЗК:ТГЗК (1:1) с КО и Г 2-10 % по массе.

Альтернативные составы летних пылеподавителей получали путем эмульгирования винилированного алкидного олигомера в воде. Полученную дисперсию изучали на способность формировать на пылящих поверхностях прочные пленки. ВАО получали поствинилированием в несколько стадий: проводили алкоголиз масла трехатомным спиртом в присутствии основания (LiOH), этерифицировали моноглицерид фталевым ангидридом, а затем осуществляли поствинилирование в присутствии дитретичного бутилпероксида с последующей полиэтерификацией и получением ВАО. Процесс осуществляли в лабораторных условиях на стандартной установке для синтеза алкидов, состоящей из трехгорлой колбы, мешалки, холодильника и термометра. Результат изучения содержания трехмерного полимера в пленках, полученных из водных дисперсий ВАО [4] показал (рис.5), что в пленках, полученных из водных дисперсий ВАО на подсолнечном масле, содержание трехмерного полимера составляет 45-50 %, так же, как и в органорастворимом аналоге [4]. В случае использования соевого масла в ВАО содержание трехмерных молекул составляет 35-37 % [4, 8].

С помощью сканирующего атомно-силового микроскопа Ntegra Prima [4] была изучена структура пленок дисперсий ВАО на поверхности слюды [4]. На рис.6 представлены изображения пленки ВАО в различных ракурсах. Пленки получаются однородными, лишь видны небольшие выпуклости размером 1-2 нм, это могут быть уплотненные сферы молекулы ВАО после образования пленки за счет сил Ван-дер-Ваальса [4].

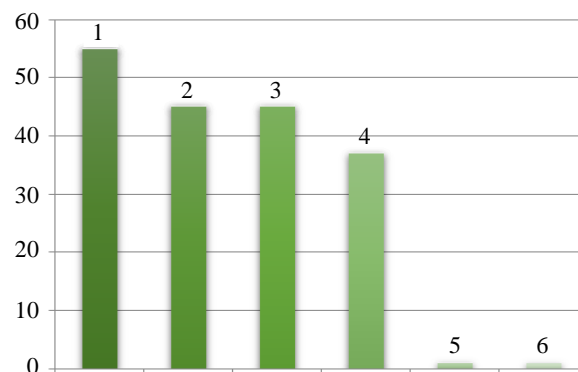


Рис.5. Концентрация полимера в составе различных алкидных дисперсий

1 – алкидный лак ПФ-060; 2 – ВАО на органических растворителях; 3 – водная дисперсия ВАО алкид на подсолнечном масле; 4 – водная дисперсия ВАО алкид на соевом масле; 5 – ПВА; 6 – акрил-стирольная дисперсия

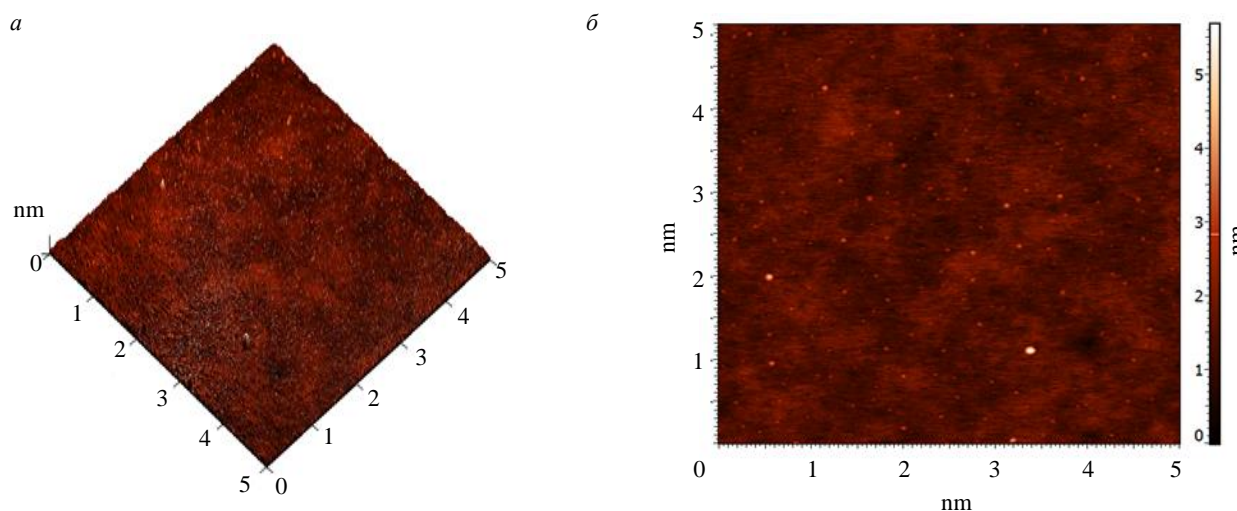


Рис.6. Изображение поверхности пленки профилактического средства на водной основе с неровностями:

а – под углом сканирования 45°, б – вид сверху



Исследования подтвердили, что пылеподаватели на основе водных дисперсий ВАО обладают рядом преимуществ: повышенной твердостью, ускоренным временем сушки, возможностью их нанесения путем пневматического или безвоздушного распыления, возможностью изготовления на стандартном оборудовании для синтеза алкидных олигомеров; отсутствием в составе органического растворителя и экологической безопасностью [4].

Для сравнительной оценки стойкости предлагаемых ПС к ветряной эрозии была сконструирована камера для моделирования процесса пылеобразования (см. рис.1). Эффективность пылеподавления оценивалась путем измерения массы пылевых частиц, которые циклон отрывал от поверхности, обработанной ПС. Поверх пылящего материала с помощью пульверизатора распылялось профилактическое средство с расходом 0,5 л на 1 м². В качестве пылящего материала анализу подверглись образцы песка, угля и уррита. В табл.2 приведены данные анализа уноса пылевых частиц до и после обработки профилактическим средством. Исследования проводились для пылеподавляющих составов на нефтяной основе и для водной дисперсии ВАО.

Таблица 2

Унос пылевых частиц ветровой эрозии до и после обработки профилактическим средством

ПС	Песок			Уголь			Уррит		
	До обработки, г	После обработки, г	Доля уноса, %	До обработки, г	После обработки, г	Доля уноса, %	До обработки, г	После обработки, г	Доля уноса, %
ВАО	1200	1178,2	1,81	1200	1157,88	3,51	1200	1146,5	4,50
ТГЗК:ЛГЗК+КО (5 %)	1200	1154,4	3,80	1200	1146	4,50	1200	1140,4	4,95
ТГЗК:ЛГЗК+Г (5 %)	1200	1155,4	3,71	1200	1147,8	4,35	1200	1142,8	4,76
ТГКК:ЛГКК+КО (5 %)	1200	1154,4	3,80	1200	1146	4,50	1200	1140,6	4,95
ТГКК:ЛГКК+Г (5 %)	1200	1155,7	3,69	1200	1148,04	4,33	1200	1143,1	4,74

Обработка ПС снижает унос пыли (табл.2), например, при обработке песка профилактическим составом на основе ВАО; процент унесенных пылевых частиц составляет 1,81 %, что является наилучшим значением. Этот же материал, обработанный составами на нефтяной основе, показал значения уноса пылевых частиц 3,69-3,80 %, что является положительным результатом и позволяет эффективно бороться с пылеобразованием. Составы на нефтяной основе эффективны, но особенно хорошо проявляют свои свойства на песке и угле. Водяные дисперсии лучше работают на нанодисперсных пылящих материалах, таких как уррит. Это легко объясняется микроструктурой дисперсии: ее частицы настолько малы, что способны обволакивать самые маленькие пылевые частицы. Полученные результаты не противоречат данным исследований P.Wang и соавторов [19, 25]. На основании экспериментальных результатов эффективность пылеподавления распылением определялась как смачиваемостью угольной пыли, так и абсолютным значением разницы между диаметрами капель и пылевых частиц ΔD_{50} . По мере увеличения диаметра частиц угольной пыли эффективность пылеподавления с помощью распыления сначала повышалась, а затем снижалась. Согласно экспериментальным исследованиям микросвойств, количество гидрофильных кислородсодержащих функциональных групп постепенно снижалось с уменьшением диаметра частиц. По мере уменьшения диаметра частиц удельная поверхность угольной пыли постепенно увеличивалась, а средний диаметр внутренних пор уменьшался. Смачиваемость пыли снижалась с уменьшением диаметра частиц, что подтверждается результатами, приведенными в табл.2.

Сравнение разработанных пылеподавательных составов с существующими показывает, что предлагаемый нефтяной состав для борьбы с пылеобразованием является конкурентным и отвечает требованиям к физико-химическим и технологическим свойствам ПС. Стоимость разработанного нефтяного состава составляет 25 руб./л, что сопоставимо с существующим аналогом – «Универсином», стоимость которого составляет 28 руб./л. Анализ рынка отечественных и импортных составов, таких как Dustclean (Россия), ArcticLine (Польша), Dustex (Германия), ArenaKleen (США), показал, что их стоимость варьируется в диапазоне 250-755 руб./л, что экономически не привлекательно для отечественных производств, ориентированных на импортозамещение.



Результаты анализа рынка летних пылеподавителей подтвердили экономическую эффективность разработанных составов на основе ВАО, так как их стоимость в разведенном виде (концентрация раствора до 10 % по массе) составляет 4 руб./л, а стоимость аналогов, таких как DustControl LQD (Россия), пылеподавителей калийных солей (Россия), «РОСА» (Россия), DirtGlue (США), варьируется в диапазоне 55-620 руб./л (кг).

Заключение. Для решения проблемы пылеобразования при добыче, переработке, транспортировке полезных ископаемых разработаны универсальные профилактические составы на нефтяной и водной основах. Предлагаемые составы позволяют решить задачи повышения эффективности добычи и перевозок твердых сыпучих материалов горнотранспортным оборудованием и улучшения экологической обстановки за счет уменьшения пылеобразования на временных карьерах и автодорогах.

В результате проведенных исследований основных физико-химических (вязкостных и низкотемпературных) свойств различных композиционных составов ПС сделаны следующие выводы:

1. Разработаны ПС на основе смеси легких и тяжелых газойлей деструктивных процессов – каталитического крекинга и замедленного коксования в соотношении 1:1 в зависимости от введения в них ТНО (крекинг-остатка и гудрона) в количестве 2-10 % по массе. Подтвержден механизм депрессорного и загущающего действия нефтяных остатков в смеси с газойлевыми фракциями. Получены и отобраны опытные образцы, отвечающие существующим техническим условиям на ПС – «Ниогрин», «Северин» и «Универсин».

2. В результате изучения влияния температуры окружающей среды и концентрации ТНО в нефтяных смесях на поверхностные свойства различных составов НДС (поверхностное натяжение, краевой угол, работу адгезии) подтверждено предположение о единстве механизма адсорбции САВ крекинг-остатка и гудрона на твердых кристаллах парафиновых углеводородов дисперсионной среды (ДС) и на металлических поверхностях, объясняющее экстремальные снижения ПН, КУ, работы адгезии, ТЗ. Доказано, что САВ крекинг-остатка более эффективны, чем САВ гудрона, так как введение КО в оптимальной концентрации 5 % по массе в смесь на базе ЛГЗК:ТГЗК (1:1) снижает поверхностное натяжение с 34 до $27 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², а введение гудрона в той же концентрации в ту же смесь снижает поверхностное натяжение с 34 до $30 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² при температуре 20 °С.

3. Исследованы трибологические (смазывающие) характеристики разработанных ПС посредством измерения диаметра пятна износа на ЧШМ. В смесях ЛГКК:ТГКК (1:1) при добавлении гудрона в концентрации 2 % по массе ДПИ уменьшается с 0,807 до 0,762 мм, а при добавлении 5 % увеличивается до 0,803 мм. Оптимальными составами с точки зрения низкотемпературных, поверхностных, адсорбционных, смачивающих и смазывающих свойств являются смеси, содержащие в своем составе ЛГКК:ТГКК (1:1) или ЛГЗК:ТГЗК (1:1) с КО и Г от 2 до 10 % масс.

4. Разработаны летние экологически чистые пылеподаватели из альтернативных источников сырья на базе водной дисперсии винилированного алкидного олигомера.

5. Проведено сравнение физико-химических и эксплуатационных свойств ПС на водной дисперсии ВАО и на нефтяной основе. Показано, что ПС на основе водной дисперсии ВАО обладают преимуществом по противопожарным и экологическим свойствам. Кроме того, ВАО закрепляет мелкодисперсные поверхности почти в два раза лучше, чем органические ПС, но ввиду высокого содержания в них воды и ее замерзания при низких температурах могут использоваться лишь в летний или теплый осенний и весенний периоды. Профилактические средства на нефтяной основе более эффективны для обработки углей, крупнодисперсных пылящих материалов и в зимний период из-за низкой температуры застывания, а следовательно, разработанные составы не являются конкурирующими, так как области их применения различаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01.01 2012 г. Уголь. Дальневосточный федеральный округ. Республика Саха (Якутия) / Сост. Т.Я.Лобанова, А.К.Назаров. М.: Росгеолфонд, 2012. 35 с.
2. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01.01 2013 г. Уголь. Дальневосточный федеральный округ Чукотский автономный округ / Сост. Г.А.Белякова. М.: Росгеолфонд, 2013. 17 с.



3. Дашко Р.Э. Инженерно-геологические аспекты негативных последствий контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами / Р.Э.Дашко, И.Ю.Ланге // Записки Горного института. 2016. Т. 228. С. 624-630. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624
4. Дринберг А.С. Синтез самоэмульгирующихся алкидных олигомеров и применение их в лакокрасочных материалах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский государственный технологический институт. СПб, 1993. 27 с.
5. Зиновьев А.П. Исследование и разработка технологии получения нефтяного универсального покрытия против пылеобразования, выдувания и прилипания сыпучих материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 1975. 24 с.
6. Исследование органических составов для снижения аэротехногенной нагрузки от автомобильных дорог угольных разрезов / А.В.Кацубин, С.В.Ковшов, И.С.Ильяшенко, В.М.Маринина // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 63-67. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-63-67
7. Ковшов С.В. Оценка выбросов пыли при транспортировании горной массы на месторождениях, разрабатываемых открытым способом / С.В.Ковшов, А.В.Пасынков // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. Т. 2. № 1. С. 78-87.
8. Летуев К.В. Технология гидрообеспыливания автомобильных дорог угольных разрезов с применением очищенных сточных и дренажных вод / К.В.Летуев, С.В.Ковшов, Е.Б.Гридина // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 1. С. 30-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-1-30-33
9. Повышаем устойчивость: отчет об устойчивости развитию СУЭК – 2018-2019 гг. URL: http://www.suek.ru/upload/iblock/fd4/SUEK_SDR_2018_2019_RU_web.pdf (дата обращения 20.06.2019).
10. Скрыбина Л.Я. Атлас промышленных пылей. М.: Цинтихимнефтемаш, 1980. Ч. 1-3. 587 с.
11. Подолян В.И. Угольная база России. Т. V. Книга 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, Сахалин, Камчатка): Монография / В.И.Подолян, Т.Н.Елисафенко, Ю.П.Пензин М.: Геоинформмарк, 1999. 638 с.
12. Фаизов М.Х. Расширение ресурсов сырья для производства профилактических смазок и пылесвязывающих веществ с улучшенными эксплуатационными и экологическими свойствами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2003. 28 с.
13. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 20.06.2019).
14. Application of polymethacrylate from waste organic glass as a pour point depressor in heavy crude oil / G.Chen, W.Yuan, F.Zhang et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 165. P. 1049-1053. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.041
15. Azama S. Effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-airpressure on rock dust inertant requirement for coal dust explosionsuppression in underground coal mines / S.Azama, D.P.Mishrab // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 126. P. 35-43. DOI: 10.1016/j.psep.2019.03.030
16. Experimental study on dust suppression at transshipment point based on the theory of induced airflow dust production / X.Zhang, H.Wang, X.Chend et al. // Building and Environment. 2019. Vol. 160. P. 1-6. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106200
17. Flame suppression mechanism of aluminum dust cloud by melamine cyanurate and melamine polyphosphate / H.Jiang, M.Bia, D.Maab et al. // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 368. P. 797-810. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.001
18. Guo Q. Foam for coal dust suppression during underground coal mine tunneling / Q.Guo, W.Ren, J.Shi // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 89. P. 170-178. DOI: 10.1016/j.tust.2019.04.009
19. Influence of Particle Diameter on the Wettability of Coal Dust and the Dust Suppression Efficiency via Spraying / P.Wang, X.Tan, L.Zhang, Y.Li, R.Liu // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 132. P. 189-199. DOI: 10.1016/j.psep.2019.09.031
20. Knox D. Drilling further with water-based fluids selecting the right lubricant / D.Knox, P.Jiang // International symposium on oilfield chemistry, 2-4 February 2005, The Woodlands, Texas. OnePetro, 2005. Vol. 5. P. 65-67. DOI: 10.2118/92002
21. Kollipara V.K. Physical, mineralogical, and wetting characteristics of dusts from interior basin coal mines / V.K.Kollipara, Y.P.Chugh, K.Mondal // International journal of coal geology. 2014. Vol. 127. P. 75-87. DOI: 10.1016/j.coal.2014.02.008
22. Kondrasheva N.K. Refinery byproducts in dust suppression and the prevention of rock adhesion and freezing at mines / N.K.Kondrasheva, O.V.Zyrianova, E.V.Kireeva // Coke and Chemistry. 2016. Vol. 59. № 9. P. 338-344. DOI: 10.3103/S1068364X16090040
23. Mineralogy, and geochemistry of coal wastes from the strazykowiec coal-waste dump / J.Ciesielczuk, M.Misz-Kennan, J.M.Fabianska, J.C.Hower // International journal of coal geology. 2014. Vol. 127. P. 42-55. DOI: 10.1016/j.coal.2014.02.007
24. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines / L.Dong, X.Tong, X.Li et al. // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 210. P. 1562-1578. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.291
25. Synergistic effect of surfactant compounding on improving dust suppression in a coal mine in Erdos, China / X.Wang, S.Yuan, X.Li, B.Jianga // Powder Technology. 2019. Vol. 344. P. 561-569. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.061

Авторы: Н.К.Кондрашева, д-р техн. наук, профессор, natalia_kondrasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9340-4888> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Е.В.Киреева, канд. техн. наук, ассистент, kireeva.e94@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6547-6139> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), О.В.Зырянова, канд. техн. наук, доцент, zyryanova_olga@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7866-8543> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.12.2020.

Статья принята к публикации 29.03.2021.