

УДК 504.3.054:57.042:54.03  
DOI 10.17513/use.38142

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СОСТАВАХ СМАЧИВАТЕЛЕЙ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ДОБЫЧЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ КАМЕННОГО УГЛЯ

**Бортников С.В., Горенкова Г.А., Сумина А.В., Комарова О.В.**

*ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Кatanова», Абакан,  
e-mail: alenasumina@list.ru*

Исследование посвящено разработке научных основ рационального использования воздушных ресурсов в части совершенствования технологий снижения пылевого загрязнения воздушной среды в районах угледобычи. В настоящей работе исследовалось взаимодействие угольной пыли с поверхностно-активными веществами (ПАВ) разной химической природы для проектирования составов эффективных смачивателей поверхности пылевых частиц. В качестве количественных характеристик использовали изменение поверхностного натяжения рабочих составов и величину адсорбции молекул ПАВ на поверхности частиц угля. В качестве катионного поверхностно-активного вещества был использован катамин, анионного – олеат натрия. Установлено, что оба исследуемых ПАВ существенно снижают поверхностное натяжение воды. Показано, что уже при малых концентрациях (0,03% для олеата натрия, 0,06% для катамина) наблюдается поверхностное натяжение, критическое для эффективного смачивания частиц угля. Несмотря на различия в химической природе катионных и анионных ПАВ, наблюдается лишь небольшое различие в степени их адсорбции на поверхности угольной пыли. Это свидетельствует о том, что выбор типа ПАВ для пылеподавления может быть основан на других факторах, таких как их токсичность или биоразлагаемость. Результаты данного исследования могут быть использованы в качестве ориентира для дальнейших исследований по проектированию и созданию смачивающих составов с лучшим пылеподавляющим эффектом для их применения в технологиях снижения пылевого загрязнения воздушной среды в районах угледобычи.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, пылеподавление, поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение, угледобыча, Хакасия

*Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 93 от 13.12.2022).*

## APPLICATION OF SURFACTANTS IN WATER-BASED WETTER COMPOSITIONS TO REDUCE DUST POLLUTION IN THE AIR DURING COAL MINING AND TRANSPORTATION

**Bortnikov S.V., Gorenkova G.A., Sumina A.V., Komarova O.V.**

*Khakass State University named N.F. Katanov, Abakan, e-mail: alenasumina@list.ru*

The study is devoted to the development of scientific foundations for the rational use of air resources, in terms of improving technologies for reducing dust pollution in the air in coal mining areas. In this work, we studied the interaction of coal dust with surfactants of different chemical natures to design compositions of effective wetting agents for the surface of dust particles. The change in surface tension of the working compositions and the amount of adsorption of surfactant molecules on the surface of coal particles were used as quantitative characteristics. Catamine was used as a cationic surfactant, and sodium oleate was used as an anionic surfactant. It was found that both surfactants under study significantly reduce the surface tension of water. It has been shown that even at low concentrations (0.03% for sodium oleate, 0.06% for catamine), surface tension is observed, which is critical for effective wetting of coal particles. Despite the differences in the chemical nature of cationic and anionic surfactants, there is only a slight difference in the degree of their adsorption on the surface of coal dust. This suggests that the choice of surfactant type for dust suppression may be based on other factors, such as toxicity or biodegradability. The results of this study can be used as a guide for further research on the design and creation of wetting compositions with a better dust suppression effect for their use in technologies for reducing dust pollution in the air in coal mining areas.

**Keywords:** air pollution, dust suppression, surfactants, surface tension, coal mining, Khakassia

*The research was supported by a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 93 of 13.12.2022).*

Как известно, в зависимости от классификационной характеристики разнятся и подходы к рациональному использованию природных ресурсов. Так, если это исчерпаемое сырьё (каменный уголь, железная руда и т.д.), то важным моментом является поиск

альтернативных источников и (или) максимальное комплексное их использование при извлечении. Рациональностью при использовании неисчерпаемых ресурсов, к которым относятся, например, воздушные, является минимизация их загрязнений.

Угольная пыль образуется и значительно распространяется во время добычи или транспортировки угля. Из-за ее летучих свойств она легко взвешивается в воздушной среде, продолжительное время остаётся в аэрозольном состоянии, в ограниченных пространствах формирует пожароопасную среду, негативно отражается на здоровье человека и животных.

В настоящее время распыление воды является одним из наиболее часто используемых методов подавления угольной пыли из-за его простоты в эксплуатации и низкой стоимости. Однако капли воды с трудом улавливают угольную пыль из-за её гидрофобного характера и относительно высокого поверхностного натяжения воды, что препятствует смачиванию поверхности пылевых частиц, и в целом снижает эффективность процесса гидрообеспыливания [1]. Анализ результатов разработок пылеподавляющих составов как российских, так и зарубежных авторов, представленный в работе [2], показал отсутствие единых принципов проектирования пылеподавляющих составов.

Большое количество исследований связано с использованием в качестве основных компонентов пылеподавляющих составов поверхностно-активных веществ (ПАВ). Показано, что добавление ПАВ может значительно повысить смачиваемость и адсорбируемость угольной пыли, тем самым оказать положительное влияние на эффективность пылеподавления [3]. Например, в исследовании Wang et al. для полевых испытаний в забое угольной шахты применялось сложное поверхностно-активное вещество [1]. Результат показал, что эффективность подавления угольной пыли была увеличена с 50% (при использовании неочищенной воды) до 90% (с помощью ПАВ). Аналогичным образом в исследовании Zhang et al. эффективность подавления с помощью сложного ПАВ составила 85% по сравнению с 65% при использовании воды в полевых испытаниях. В других исследованиях Zhao Z. общая эффективность пылеподавления додецилбензолсульфонатом натрия составила 76% по сравнению с 54% при использовании неочищенной воды [4].

Существует два типа методов оценки эффективности пылеподавления поверхностно-активных веществ: статические и динамические испытания [5]. В первом варианте изучают такие физико-химические характеристики, как адсорбция и смачиваемость, характеризующие эффективность

действия поверхностно-активных веществ. Наиболее частым исследуемым свойством для пылеподавляющих растворов является поверхностное натяжение. При этом основное действие ПАВ направлено на снижение поверхностного натяжения воды, что достигается за счет их способности адсорбироваться на поверхности раздела фаз. Такая способность обусловлена особым строением молекулы ПАВ, одна часть которой представлена полярной группой ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{COOH}$ ), а другая – неполярной (углеводородный радикал) [6].

Динамические испытания позволяют оценить эффективность пылеподавления с помощью ПАВ, которая рассчитывается по концентрациям пыли, измеренным до и после распыления ПАВ, используются гораздо реже из-за более высоких временных затрат и стоимости.

На эффективность пылеподавляющих свойств ПАВ могут оказывать влияние различные факторы и условия, такие как сорт угля, концентрация пыли и скорость ветра. При этом они могут быть неконтролируемыми и не иметь аналогов на других угольных карьерах, что может существенно сказаться на снижении концентрации угольной пыли в воздухе [7].

В зависимости от строения полярной части среди ПАВ выделяют анионные (диссоциирующие в воде с образованием поверхностно-активного аниона) и катионные (с образованием поверхностно-активного катиона). Не существует единого вывода о том, какой тип поверхностно-активного вещества более подходит для пылеподавления. Некоторые исследования показали, что катионные поверхностно-активные вещества легко адсорбируются на поверхности угля, что приводит к гидрофобности, которая не способствует смачиванию закачиваемой водой [8]. Другие, напротив, показали, что анионные поверхностно-активные вещества склонны к образованию осадков с другими ионами в воде и препятствуют закачке воды в угольный пласт, в то время как катионные поверхностно-активные вещества не требуют высокого качества воды, и их нелегко осаждают с другими ионами в воде [9].

Цель работы заключалась в разработке научных основ рационального использования воздушных ресурсов в части совершенствования технологий снижения пылевого загрязнения воздушной среды в районах угледобычи. Исследовалось взаимодействие угольной пыли с поверхностно-ак-

тивными веществами разной химической природы для проектирования составов эффективных смачивателей поверхности угольных частиц.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись мелкие частицы каменного угля с Черногорско-го каменноугольного месторождения разреза «Степной», расположенного в Республике Хакасия. В качестве катионного поверхностно-активного вещества был использован катамин, который представляет собой четвертичную аммониевую соль – смесь алкилдиметилбензиламмоний хлоридов. Анионное поверхностно-активное вещество – олеат натрия. Концентрацию водных растворов ПАВ варьировали от 0,0075 до 1%. Адсорбцию ПАВ проводили из 50 мл раствора 1 граммом угольной пыли. О концентрации ПАВ в процессе адсорбции судили по измерению поверхностного натяжения растворов катамина и олеата натрия до и после контакта с углем сталагмометрическим методом.

Для сравнения адсорбирующей способности ( $\Gamma$ ) угольной пыли по отношению к растворам катамина и олеата натрия была изучена зависимость массы адсорбированного ПАВ, приходящаяся на навеску

угля массой 1 г. Расчет производился по формуле:

$$\Gamma = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}) \cdot V}{m},$$

где  $m$  – навеска угля,  $V$  – объем раствора, из которого идет адсорбция.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Как было отмечено выше, одним из наиболее часто используемых, относительно простых и информативных показателей в оценке пылеподавляющих способностей ПАВ является поверхностное натяжение. Поэтому на первом этапе было произведено измерение данного показателя у исследуемых растворов поверхностно-активных веществ. Результаты измерения поверхностного натяжения растворов катионных и анионных ПАВ представлены в таблице и на рисунках 1, 2.

Из рисунков 1 и 2 следует, что катамин и олеат натрия существенно снижают поверхностное натяжение воды. Это согласуется с общепринятым механизмом действия ПАВ, который заключается в их способности адсорбироваться на границах раздела различных фаз и тем самым снижать поверхностное натяжение.

Результаты измерения поверхностного натяжения образцов анионного и катионного ПАВ

| № образца    | Исходная концентрация раствора ПАВ, % | Поверхностное натяжение, Н/м | Концентрация раствора ПАВ после контакта с углем, % | Поверхностное натяжение, Н/м |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
| Катамин      |                                       |                              |   |                              |
| 1            | 0,0075                                | 56,4                         | 0,0025  | 66,7                         |
| 2            | 0,015                                 | 52,6                         | 0,006   | 58,0                         |
| 3            | 0,03                                  | 46,3                         | 0,0095  | 54,9                         |
| 4            | 0,06                                  | 43,4                         | 0,022   | 48,0                         |
| 5            | 0,13                                  | 43,1                         | 0,04  | 46,0                         |
| 6            | 0,25                                  | 38,5                         | 0,04  | 46,0                         |
| 7            | 0,5                                   | 38,5                         | 0,12  | 41,93                        |
| 8            | 1                                     | 34,9                         | 0,16  | 40,3                         |
| Олеат натрия |                                       |                              |   |                              |
| 1            | 0,0075                                | 69,2                         | 0   | 72,2                         |
| 2            | 0,015                                 | 56,0                         | 0   | 72,1                         |
| 3            | 0,03                                  | 45,4                         | 0   | 72,2                         |
| 4            | 0,06                                  | 40,3                         | 0   | 72,1                         |
| 5            | 0,13                                  | 35,8                         | 0   | 71,1                         |
| 6            | 0,25                                  | 30,9                         | 0,19  | 31,7                         |
| 7            | 0,5                                   | 30,6                         | 0,23  | 30,4                         |
| 8            | 1                                     | 30,9                         | 0,17  | 33,3                         |

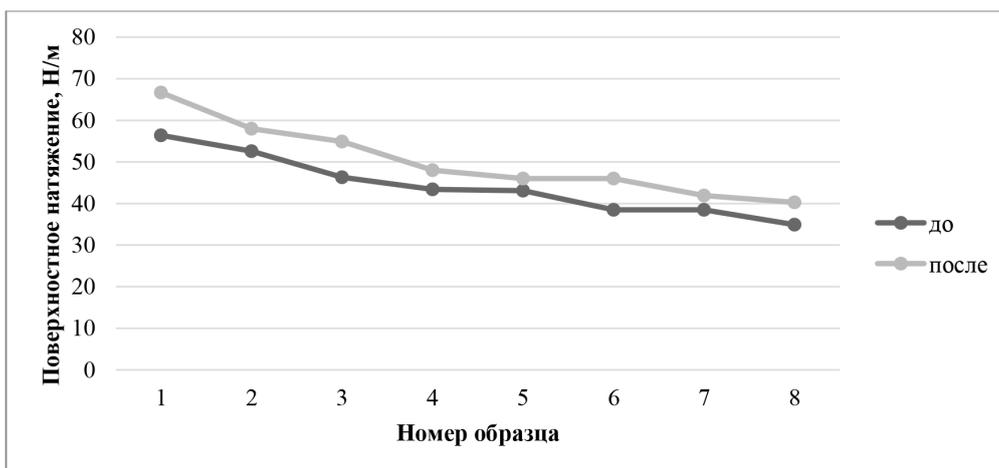


Рис. 1. Поверхностное натяжение растворов катамина различной концентрации до и после контакта с угольной пылью

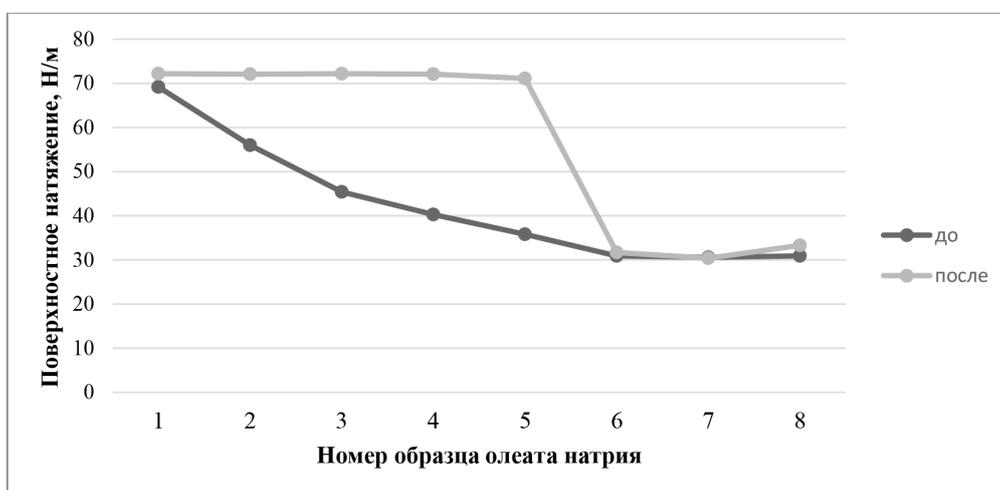


Рис. 2. Поверхностное натяжение растворов олеата натрия различной концентрации до и после контакта с угольной пылью

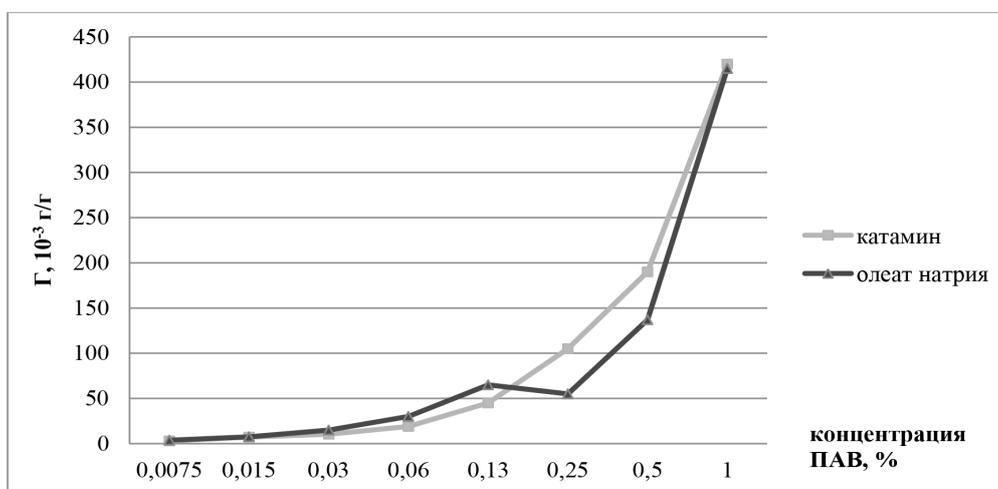


Рис. 3. Масса адсорбированного ПАВ в расчете на 1 г угольной пыли

Можно предположить, что адсорбция исследуемых ПАВ на поверхности угля уменьшает силы внутренней когезии воды и позволяет ей легче смачивать поверхность угольной пыли. Следует отметить, что в литературных источниках поверхностное натяжение раствора около 45 Н/м оценивается как критическое для эффективного смачивания частиц угля [5]. В случае катамина и олеата натрия такое поверхностное натяжение наблюдается для растворов с концентрацией катамина 0,06%, для олеата натрия – 0,03%.

В ходе эксперимента обнаружено, что после контакта с углем поверхностное натяжение растворов возрастает. Это может быть интерпретировано как следствие уменьшения концентрации ПАВ в растворе вследствие поглощения молекул ПАВ угольной пылью. Полученные в результате исследования данные представлены на рисунке 3.

Анализ зависимости массы адсорбированного ПАВ на угольной пыли позволяет выявить влияние концентрации поверхностно-активных веществ на степень их адсорбции на поверхности угольной пыли. При низких концентрациях ПАВ наблюдается небольшая величина адсорбции, по мере увеличения концентрации адсорбция резко возрастает. Причем резкое возрастание адсорбции наблюдается при критической концентрации ПАВ, необходимой для эффективного смачивания частиц угля.

Угольная поверхность гидрофобна, и поверхностно-активные вещества адсорбируются на ней своими гидрофобными частями. В молекуле катамина гидрофобен катион, а в олеате натрия – анион. Следует подчеркнуть, что адсорбция олеата натрия на поверхности угля в диапазоне концентраций от 0,015% до 0,06% превосходит адсорбцию катамина. С другой стороны, адсорбция катамина при концентрациях от 0,13% до 1% оказывается немного выше, чем у олеата натрия. Можно предположить, что это различие связано с влиянием молекулярной массы и химической природы углеводородных радикалов на процесс адсорбции поверхностно-активных веществ на угольной поверхности [10]. Катамин обладает большей молекулярной массой по сравнению с олеатом натрия. Кроме того, в случае алкилдиметилбензиламмоний хлорида, помимо молекулярной массы, стоит учесть и наличие ароматических углеводородных радикалов в его составе. Эти ароматические группы могут играть важную роль во взаимодействии этого соединения с по-

верхностью угля. Молекулы ПАВ, содержащие ароматические углеводородные радикалы, могут обладать преимуществом в процессе адсорбции на гидрофобной угольной поверхности. Гидрофильные части ПАВ взаимодействуют с водой, обуславливая лучшее смачивание частиц угольной пыли, тем самым ускоряя процесс ее оседания.

### Выводы

На основе проведенного анализа и экспериментов можно сделать следующие ключевые выводы.

1. Исследовано взаимодействие катионного и анионного поверхностно-активных веществ с угольной пылью. Установлено, что катамин (катионное ПАВ) и олеат натрия (анионное ПАВ) существенно снижают поверхностное натяжение воды уже при малых концентрациях (0,03% для олеата натрия, 0,06% для катамина). Причем концентрация олеата натрия, при которой достигается поверхностное натяжение раствора около 45 Н/м (критическое для эффективного смачивания частиц угля), в два раза меньше, чем для катамина. Данный факт имеет важное значение для разработки рациональных подходов использования воздушных ресурсов и минимизации влияния химических составов смачивателей (посредством использования смесей реагентов с низкой концентрацией) на окружающую среду.

2. Несмотря на различия в химической природе катионных и анионных ПАВ, наблюдается лишь небольшое различие в степени их адсорбции на поверхности угольной пыли. Это свидетельствует о том, что выбор типа ПАВ для пылеподавления может быть основан на других факторах, таких как их токсичность или биоразлагаемость.

Исследование имеет важное значение для разработки эффективных методов подавления угольной пыли, что может сократить риски для окружающей среды и здоровья человека в угольной промышленности. Эти результаты также могут привести к разработке улучшенных технологий, связанных с добычей, транспортировкой и переработкой каменного угля, и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

На практике поверхностно-активные вещества обладают хорошей смачиваемостью, снижают поверхностное натяжение водных растворов и могут способствовать адсорбции воды на частицах угля, поэтому распыление растворов поверхностно-активных веществ на угольную пыль, находящуюся в воздухе, снижает запыленность. Ка-

чество поверхностно-активного вещества оказывает прямое влияние на эффективность пылеподавления.

Результаты этого исследования могут быть использованы в качестве ориентира для дальнейшего выбора поверхностно-активных веществ с лучшим пылеподавляющим эффектом при добыче угля.

#### Список литературы

1. Zhao Z., Chang P., Xu G., Xie Q., Ghosh A. Comparison of static tests and dynamic tests for coal dust surfactants evaluation: A review // *Fuel*. 2022. Vol. 330. P. 125625.
2. Строкова В.В., Ишмухаметов Э.М., Есина А.Ю., Маркова И.Ю., Губарева Е.Н., Абзалилова А.В., Шаповалов Н.А. Пылеподавляющие составы на водной основе: анализ состояния и перспективы развития // *Вестник Технологического университета*. 2021. Т. 24. № 12. С. 5-38.
3. Бортников С.В., Горенкова Г.А. Смачиватель для подавления угольной пыли // Патент РФ № 2689469. Патентообладатель ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова». 2019. Бюл. № 16.
4. Zhao Z., Chang P., Xu G., Ghosh A., Li D., Huang J. Comparison of the coal dust suppression performance of surfactants using static test and dynamic test // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 328. P. 129633. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129633.
5. Гаврилова Д.И. Изучение взаимодействия углей с полимерными эмульсиями различного состава // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 12. С. 86–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-86-101.
6. Коршунов Г.И., Мазаник Е.В., Ерзин А.Х., Корнев А.В. Эффективность применения поверхностно-активных веществ для борьбы с угольной пылью // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 3. С. 55-61.
7. Chang P., Zhao Z., Xu G., Ghosh A., Huang J., Yang T. Evaluation of the coal dust suppression efficiency of different surfactants: A factorial experiment // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020. Vol. 595. P. 124686. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.124686.
8. Zhou Q., Qin B. Coal dust suppression based on water mediums: A review of technologies and influencing factors // *Fuel*. 2021. Vol. 302. P. 121196. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121196.
9. Xu G., Chen Y., Eksteen J., Xu J. 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.2028.05.182.
10. Муллина Э.Р., Мишурина О.А. Исследование адсорбции сложных эфиров линейного строения на поверхности газовых углей // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 12. С. 26-30.