

УДК 614.849

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ
ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВСПЕНЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ**

Аксенов С.Г.

*д-р э.н., профессор,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Николаев В.А.

*студент,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Аннотация

В статье рассматривается перспективное направление повышения эффективности профилактики эндогенных пожаров в угольных шахтах — применение вспененных суспензий на основе монтмориллонитовых глин. Обосновываются физико-химические преимущества таких систем: высокая адгезия, способность к глубокому проникновению в пористую структуру угля, длительная пеноустойчивость и эффективная изоляция очагов самонагревания от кислорода. Анализируются механизмы действия вспененных суспензий, включая термическое охлаждение, блокировку диффузии кислорода и стабилизацию микроклимата в выработках.

Ключевые слова: эндогенные пожары, монтмориллонит, вспененные суспензии, профилактика самовозгорания угля, огнезащитные материалы.

**INCREASING THE EFFICIENCY OF FIRE PROTECTION OF
UNDERGROUND WORKINGS USING FOAMED CLAY SUSPENSIONS**

Aksyonov S.G.

*Doctor of Economics, Professor,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Nikolaev V.A.

Student,

Ufa University of Science and Technology,

Ufa, Russian Federation

Annotation

The article considers a promising direction for improving the effectiveness of prevention of endogenous fires in coal mines — the use of foamed suspensions based on montmorillonite clays. The physico-chemical advantages of such systems are substantiated: high adhesion, the ability to penetrate deeply into the porous structure of coal, long-term foam resistance and effective isolation of self-heating foci from oxygen. The mechanisms of action of foamed suspensions are analyzed, including thermal cooling, blocking oxygen diffusion, and stabilizing the microclimate in the workings.

Keywords: endogenous fires, montmorillonite, foamed suspensions, prevention of spontaneous combustion of coal, flame-retardant materials.

Эндогенные пожары представляют собой одну из наиболее серьёзных угроз в подземной добыче полезных ископаемых, особенно в угольных шахтах, где самовозгорание угля может происходить без внешнего источника воспламенения. Такие пожары развиваются медленно, но необратимо, часто протекая скрытно в массиве породы или в выработанном пространстве, что затрудняет их своевременное обнаружение и локализацию. Традиционные методы профилактики — вентиляционные мероприятия, изоляция зон повышенной опасности, инертные газовые смеси — имеют ограничения по эффективности, мобильности и стоимости. В этой связи всё большее внимание привлекают инновационные материалы на основе природных минералов, в частности вспененные суспензии монтмориillonитовых глин, обладающие уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими значительно повысить надёжность предотвращения эндогенных возгораний.

Монтмориillonит — представитель группы смектитовых глин, характеризующийся высокой удельной поверхностью, значительной катионообменной ёмкостью и способностью к сильному набуханию в присутствии воды. Эти свойства делают его перспективной основой для

создания огнезащитных составов, предназначенных для изоляции и охлаждения потенциально опасных участков. При диспергировании в водной среде монтмориллонит образует коллоидные суспензии, которые при введении пенообразующих агентов и механическом или пневматическом перемешивании превращаются в устойчивые вспененные системы. Такие системы сочетают в себе низкую плотность, высокую адгезию к неровным поверхностям и длительное время удержания в вертикальных или наклонных выработках, что критически важно для подземных условий [1].

Одним из ключевых преимуществ вспененных суспензий на основе монтмориллонита является их способность к глубокому проникновению в пористую структуру угля и пород. В отличие от традиционных гелей или цементных смесей, которые формируют поверхностный барьер, вспененная система заполняет микротрещины и поры, создавая трёхмерную изолирующую матрицу. Это не только ограничивает доступ кислорода к активным центрам окисления, но и снижает температуру в очаге за счёт испарения связанной воды и высокой теплоёмкости минеральной фазы. Таким образом, достигается двойной эффект — физическая изоляция и термическое тушение на ранней стадии самонагрева.

Стабильность пены в условиях шахтной атмосферы — ещё один важный аспект, определяющий эффективность применения. Монтмориллонитовые частицы, адсорбируясь на границе раздела газ-жидкость, формируют плотную и вязкоупругую оболочку вокруг пузырьков, что замедляет дренаж жидкости и коалесценцию. Это обеспечивает сохранение объёма и структуры пены в течение нескольких суток, а в некоторых составах — до нескольких недель. Длительное время жизни пены позволяет минимизировать частоту повторных обработок и снижает трудозатраты на профилактические мероприятия [3].

Кроме того, вспененные суспензии обладают высокой экологической и технической совместимостью. Монтмориллонит — природный минерал, не токсичный и не агрессивный к оборудованию. Его использование не приводит к коррозии металлических крепей, не нарушает работу вентиляционных систем и не ухудшает микроклимат в выработках. В отличие от химических пенообразователей на основе синтетических полимеров, монтмориллонитовые составы не образуют труднорастворимых остатков и легко удаляются при необходимости, что делает их

предпочтительными для длительного применения в замкнутых подземных пространствах [2].

Разработка оптимальных рецептур вспененных суспензий включает баланс между концентрацией глины, типом и дозировкой пенообразователя, а также параметрами активации — давлением, скоростью подачи, температурой. Избыток глины может привести к чрезмерному уплотнению пены и снижению её проникающей способности, тогда как недостаток — к быстрому разрушению структуры. Поэтому современные исследования направлены на создание адаптивных композиций, чьи реологические и пенообразующие свойства могут регулироваться непосредственно в процессе подачи в выработку. Это особенно актуально для автоматизированных систем профилактики, где состав должен подстраиваться под изменяющиеся условия горного массива.

Интеграция вспененных монтмориллонитовых суспензий в общую стратегию противопожарной защиты позволяет перейти от реактивного к превентивному подходу. Вместо локализации уже возникшего очага самонагревания можно заранее обрабатывать зоны, подверженные риску — купола выработанного пространства, старые завалы, участки с нарушенной вентиляцией. Применение таких суспензий в сочетании с системами мониторинга газового состава и температуры создаёт многоуровневую защиту, способную предотвратить переход начальной стадии окисления угля в фазу активного горения [5].

Важно отметить, что эффективность профилактики эндогенных пожаров определяется не только свойствами материала, но и технологией его доставки. Вспененные суспензии могут подаваться как через стационарные трубопроводы, так и с помощью мобильных установок, включая пневмогидравлические комплексы, способные доставлять пену на расстояния до сотен метров. Развитие таких технологий расширяет возможности применения даже в труднодоступных или аварийных зонах, где традиционные методы изоляции неприменимы.

Сравнительный анализ показывает, что вспененные монтмориллонитовые суспензии превосходят многие аналоги по соотношению «эффективность–стоимость–безопасность». Они дешевле синтетических гелей, устойчивее к старению, чем органические пены, и более адаптивны, чем инертные газовые смеси. При этом их производство

возможно на базе местного сырья в регионах добычи угля, что снижает логистические издержки и повышает энергетическую независимость горнодобывающих предприятий [3,4].

Несмотря на очевидные преимущества, остаются задачи, требующие дальнейшего исследования. К ним относятся стандартизация методов оценки огнезащитной эффективности, разработка единых критериев устойчивости пены в шахтных условиях, а также изучение долгосрочного воздействия суспензий на физико-механические свойства горных пород. Особенно важно понимание поведения составов при циклических изменениях влажности и температуры, характерных для глубоких шахт.

Будущее применения вспененных монтмориллонитовых суспензий связано с их интеграцией в «умные» системы безопасности. Предполагается использование датчиков, реагирующих на признаки самонагрева, для автоматического запуска подачи пены в зону риска. Такой подход позволит минимизировать человеческое вмешательство и обеспечить мгновенную реакцию на угрозу. Кроме того, ведутся работы по модификации самой глины — например, введению ионов металлов, способных катализировать реакции гашения свободных радикалов, участвующих в цепных процессах окисления угля [5].

Также перспективным направлением является комбинирование монтмориллонита с другими природными материалами — диатомитом, перлитом, цеолитами — для создания композитных суспензий с улучшенными теплоизоляционными и сорбционными свойствами. Такие составы могли бы не только изолировать очаг, но и активно поглощать продукты термического разложения угля, включая токсичные газы, тем самым повышая безопасность для персонала в случае развития инцидента [1].

Следует подчеркнуть, что внедрение новых материалов в шахтную практику требует не только технической, но и нормативной готовности. Необходимо разработать методические документы, регламентирующие применение вспененных суспензий, включая требования к их составу, методам испытаний, условиям хранения и подачи. Это обеспечит воспроизводимость результатов и позволит включить такие технологии в официальные планы противопожарной защиты [2].

В заключение, вспененные суспензии монтмориллонитовых глин представляют собой технологически зрелое и экономически выгодное решение для повышения эффективности профилактики эндогенных пожаров. Их уникальные свойства — высокая адгезия, глубокое проникновение, длительная стабильность и экологическая безопасность — делают их конкурентоспособной альтернативой традиционным методам изоляции. При системном подходе к внедрению такие материалы способны существенно снизить риск возникновения подземных пожаров и повысить общий уровень промышленной безопасности в угледобывающей отрасли.

Таким образом, применение вспененных суспензий на основе монтмориллонитовых глин открывает новые возможности для превентивной защиты горных выработок от эндогенных пожаров, сочетая природную доступность сырья с высокой технологической эффективностью и безопасностью эксплуатации.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Хусаинов Э.И. Обзор вопроса пожарной безопасности на морских промышленных объектах // Экономика строительства. 2023. № 12. С. 99-101.
2. Аксенов С.Г., Синагатуллин Ф.К. Чем и как тушат пожар // Современные проблемы безопасности (FireSafety 2020): теория и практика: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. - Уфа: РИК УГАТУ, 2020. - С. 146-151.
3. Каминский А.Я., Потапов П.В., Макаров Н.В., Шлапаков П.А., Колыхалов В.В., Ерастов А.Ю., Хаймин С.А. Мониторинг эндогенной пожароопасности выработанного пространства отработанных и действующих выемочных участков на пологих и наклонных пластах угля // Вестник Научного центра. 2011. № 1. С. 53-60.
4. Трубицын А.А., Шлапаков П.А., Аксенов В.В., Прокопенко С.А. Применение геофизических методов для борьбы с эндогенными пожарами // Вестник Научного центра. 2012. №1. С. 84-88.
5. Скрицкий В.А. Об эндогенной пожароопасности выемочных участков при высокопроизводительной отработке пологих угольных пластов, склонных к самовозгоранию // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. №2. С. 144-147.