

УДК 622.41:533.6

Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЭНДОГЕННОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ*

Эндогенная пожароопасность выработанных пространств угольных шахт определяется в значительной степени аэродинамическими параметрами выемочных участков. Локализация очагов самовозгорания в выработанных пространствах возможна на основе объемного моделирования фильтрационных потоков утечек, позволяющего выявить зоны опасных скоростей фильтрации в объеме выработанного пространства и обоснованно выбрать меры по профилактике и ликвидации самовозгораний.
Ключевые слова: самовозгорание угля; эндогенная пожароопасность угольных шахт; аэродинамика выработанных пространств; компьютерное объемное моделирование.

Эндогенная пожароопасность угольных шахт связана с разработкой пластов, склонных к самовозгоранию. К ним относится большинство пластов высококачественного угля, разрабатываемых в настоящее время в Южном Кузбассе, которые к тому же являются высокогазоносными. Пожары являются авариями, сопровождающимися значительным ущербом, вплоть до полной остановки шахты и потери месторождения. Особенно опасны они при разработке сближенных газоносных пластов, когда пожар может стать источником воспламенения и взрыва метана. Сегодня на крупных шахтах, отработывающих свиты газоносных пластов с высокой интенсивностью, эндогенные пожары в выработанных пространствах отработанных выемочных полей стали обычным явлением, постоянно сопровождающим штатное ведение горных работ.

Сложность ликвидации очагов самовозгорания в выработанных про-

странствах состоит в том, что локализация его затруднена большими объемами отработанных полей, а также применяемыми схемами вентиляции, не позволяющими на ранних стадиях выявлять наличие процесса самонагревания по косвенным признакам (рост концентрации СО и СО₂, изменение температуры воздуха в утечках и др.).

Самовозгорание представляет собой процесс низкотемпературного окисления угля кислородом воздуха, сопровождающийся выделением тепла. В условиях накопления выделяющегося тепла этот процесс ускоряется и становится необратимым. Особенностью самонагревания угля в выработанном пространстве действующих очистных забоев является то, что физические условия окисления угля (температура, влажность, приток кислорода) подвержены здесь значительным изменениям во времени и пространстве.

Если прилегающее к забою пространство характеризуется интенсив-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, Соглашение №14.В37.21.0655.

ным проветриванием активной струей воздуха, проходящего по лаве, то в глубине выработанного пространства уголь и породы оказываются в определенной степени изолированными с точки зрения тепломассопереноса от прилегающих горных выработок с интенсивной вентиляцией. Изоляция этих зон нарушается утечками воздуха, которые представляют собой фильтрационные потоки, имеющие место при слоевой выемке, при больших действующих напорах (более 100 Па) на выемочных участках, при малой ширине охранных целиков и т.п.

По мере подвигания очистного забоя и слеживания пород зоны с физическими условиями, способствующими самонагреванию, перемешаются в пространстве. Увеличение скорости подвигания очистных забоев при интенсивной выемке современными комплексами до десятков метров в сутки способствует повышению проницаемости выработанных пространств, т.е. увеличению скоростей фильтрации и увеличению притока в них кислорода.

Пожароопасная величина утечек воздуха, как было установлено исследованиями ВостНИИ [1], лежит в диапазоне 0,1–0,9 м³/мин·м², максимальная интенсивность развития процесса самовозгорания обеспечивается при притоке воздуха в объеме 0,3 – 0,6 м³/мин·м². Для трещиноватых целиков значения опасной скорости снижаются в десятки раз: 0,001 – 0,06 м³/мин·м² [2], что связано с большой мощностью слоя угля в целиках.

Мощность слоя угля в выработанном пространстве также оказывает весьма существенное влияние на характер его самонагревания. При слоевой выемке мощных пластов, или при выемке с оставлением пачек угля, которые при обрушении увеличивают толщину окис-

ляющегося слоя, происходит перемешивание угля и обрушающейся породы. На формирование слоя существенно влияет угол падения пласта [3].

Таким образом, процесс самонагревания угля в выработанных пространствах зависит не только от химической активности углей, но и от горногеологических и горнотехнических условий выемки, важнейшими из которых являются: вынимаемая мощность пласта и его потери по мощности, угол падения пласта, способ управления кровлей и способ изоляции отработанных участков, скорость подвигания очистного забоя и условия притока кислорода, определяемые особенностями применяемых схем вентиляции.

Установлено, что убывание концентрации кислорода (С) по мере удаления от лавы вглубь выработанного пространства описывается экспоненциальной зависимостью вида:

$$C = C_0 e^{-k(x-x_0)} \quad (1)$$

где C_0 – концентрация кислорода в зоне интенсивного проветривания; k – коэффициент экспоненциального убывания концентрации кислорода; x – расстояние от фронта обрушения до соответствующей точки в выработанном пространстве, м; x_0 – ширина зоны интенсивного проветривания, м.

Шахтные исследования, проведенные для возвратноточной схемы проветривания в Карагандинском бассейне Шалаевым [2] показали, что распределение кислорода в выработанном пространстве весьма неравномерно: вдоль откаточного конвейерного штрека убывание концентрации кислорода идет медленнее, чем вдоль вентиляционного, что объясняется выносом метана из выработанного пространства, а также частичным поглощением кислорода, т.к. со стороны откаточного штрека

утечки с высокой концентрацией кислорода входят в выработанное пространство, а со стороны вентиляционного – выходят на сопряжение его с лавой. При этом характер зависимости (1) вдоль откаточной выработки одинаков независимо от направления выемки – по падению или по простиранию. А вдоль вентиляционного штрека коэффициент k при работе лавы по падению существенно ниже, чем по простиранию, т.к. метан как легкий газ при работе по падению более равномерно заполняет верхнюю часть выработанного пространства.

Эти исследования также показали, что применение любого способа управления газовыделением из выработанного пространства приводит к усилению проветривания последнего и повышает его эндогенную пожароопасность. При этом изменения коэффициента k вдоль откаточного штрека практически не наблюдается, а вдоль вентиляционного – отмечена зависимость его от коэффициента дегазации K_d [2, 3]:

$$k' = k (1 - 0,78 K_d) \quad (2)$$

где k' – коэффициент экспоненциального убывания кислорода при дегазации выработанного пространства.

Эти результаты подтверждают, что аэродинамический режим выработанного пространства играет важнейшую роль в обеспечении эндогенной пожаробезопасности. Сущность аэродинамического метода предупреждения самовозгорания состоит в том, чтобы в зоны с очагами самонагрева поступление воздуха было бы либо полностью прекращено, либо осуществлялось в таких режимах, при которых утечками воздуха осуществлялся бы отвод тепла, не допускающий нагрева угля до критических температур. В этом плане важнейшее значение приобретают способы количе-

ственной оценки степени пожароопасности выработанных пространств.

При оценке пожароопасности выработанных пространств необходимо исходить из того, что опасность возникновения и развития пожара определяется наличием в обрушенном массиве ограниченных локальных зон фильтрации воздуха в режимах, которые являются опасными, вызывающими самовозгорание угля. Размеры таких зон и время их существования определяют вероятность возникновения пожара в выработанном пространстве. В процессе развития горных работ динамика распределения пожароопасных зон определяется совокупностью перечисленных выше факторов: горнотехнических (скоростью подвигания забоя, системой разработки и схемой вентиляции) и аэродинамических (общим расходом воздуха на выемочном участке, аэродинамическими сопротивлениями выработанного пространства, структурой скоростного поля фильтрационного потока).

Решения пространственных задач аэродинамики зон обрушения дают возможность нового подхода к оценке пожароопасности выработанных пространств, который позволял бы определять эндогенную пожароопасность в широком диапазоне указанных выше факторов и оценивать количественно эффективность того или иного профилактического мероприятия.

Сущность этого подхода заключается в определении величины пожароопасных зон, т.е. в выделении из пространственного фильтрационного потока областей, ограниченных верхним и нижним пределами пожароопасных скоростей фильтрации и изучении их динамики.

Возможность количественной оценки аэродинамических условий пожа-

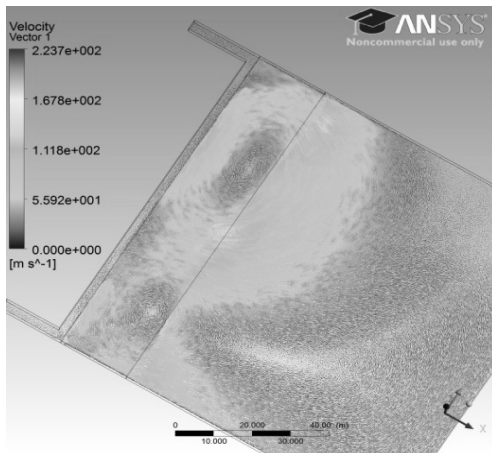


Рис. 1. Распределение векторов скорости в системе «горные выработки-выработанное пространство»

роопасности выработанных пространств приобретает особо значимую роль с точки зрения поддержания по возможности максимально или полностью пожаробезопасных режимов вентиляции. В газообильных угольных шахтах при разработке пластов, склонных к самовозгоранию, два фактора — загазирование и пожароопасность — принимают во внимание при выборе режима вентиляции. При этом фактор пожароопасности используется обычно как дополнительный: режим вентиляции определяется фактором газообильности, пожароопасность же снижается путем применения параллельных мероприятий — снижением утечек воздуха, изоляцией выработанных пространств, снижением потерь угля, обработкой антипирогенами и т.п.

Таким образом, для определения пожароопасных зон в фильтрационных потоках необходимо знать диапазоны скоростей фильтрации воздуха, при которых наблюдается самовозгорание углей. Определение таких скоростей является сложной задачей, которая решалась в ВостНИИ путем

проведения трудоемких экспериментальных исследований. Полученные результаты являются достаточно надежными. Исследования В.М. Маевской и А.П. Рапоцевича показали, что диапазон пожароопасных значений скорости фильтрации воздуха в дробленом угле определяется величинами

$$V_{\min} = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}, V_{\max} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

При скорости фильтрации $V < V_{\min}$ процесс окисления угля происходит недостаточно интенсивно и не переходит в стадию самовозгорания. При $V > V_{\max}$ процесс окисления осуществляется интенсивно, но и рассеивание тепла в пористой среде происходит настолько интенсивно, что температура струи не обеспечивает поддержание и развитие процесса горения.

Для установления границ пожароопасных зон необходимо, следовательно, изучение динамики областей, ограниченных указанными диапазонами скоростей в фильтрационном потоке. Ранее эта задача решалась на основе зависимостей распределения скоростей фильтрации, полученных на физических моделях. Ограниченность их связана с достаточно мелким масштабом моделирования, который не позволял определить аномальные области траекторий движения воздуха в зоне обрушения. Сегодняшние возможности цифрового объемного моделирования в реальном режиме времени и в масштабе 1:1 позволяют с высокой точностью определить локализацию аномальных зон фильтрационных течений воздуха в выработанном пространстве.

Исследования на компьютерных аналогах подземных аэрогазодинамических систем показали, что в области выработанного пространства образуются локальные зоны с низкими скоростями течения воздуха (рис. 1). При

моделировании рассматриваются фильтрационные утечки – их объем и скорость в зоне обрушенных вмещающих пород. На рисунке видны две зоны выработанного пространства: первая зона, в районе 20 метров от лавы – обрушение непосредственной кровли; и вторая, на расстоянии более 20 метров от лавы, посадка основной кровли. В этом случае рассматривались различные коэффициенты макрошероховатости и проницаемости для разных зон.

При переходе из одной зоны в другую отчетливо видны локальные ускорения скорости фильтрации за счет уменьшения сечения пор. Исследования показали, что при высокой проницаемости и пористости выработанного пространства происходит большое количество утечек на сопряжении воздухоподающей выработки с лавой, которое может достигать 50 % более. В выработанном пространстве образуются зоны циркуляции и зоны застоя. Также обнаружено, что при высокой проницаемости обрушенных пород по всему очистному забою возможны утечки и подсосы метановоздушной смеси. То есть при интенсивном проветривании качественный и количественный состав рудничной атмосферы вдоль лавы постоянно меняется.

Компьютерное моделирование в реальном геометрическом масштабе позволяет исследовать и оценить эндогенную пожароопасность различных вариантов схем вентиляции выемочных участков, влияние скорости подвигания очистного забоя (через изменение проницаемости выработанного пространства), геометрических параметров выемочного участка (длины лавы и выемочного столба).

Для создания компьютерных аналогов подземных аэрогазодинамических систем требуются технологические данные, такие как скорость движения воздуха по лаве, сечения выработок выемочного участка и горногеологические параметры, такие как крепость вмещающих пород и их состав. Причем правильность введенных в начальных условиях исходных данных определяет точность полученных результатов. Полученные виртуальные модели позволяют в режиме *online* оценивать наличие и размеры зон, способствующих развитию процесса самонагревания, а также подбирать оптимальные аэродинамические режимы проветривания выемочного участка и выработанного пространства, обеспечивающие как метановую безопасность, так и предупреждение возможного эндогенного пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маевская В.М., Линденау Н.И., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
2. Пучков Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств. – М.: Изд-во МГГУ, 1993. – 267 с.
3. Глузберг Е.И., Гращенко Н.Ф., Шалаев В.С. Комплексная профилактика газовой и пожарной опасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1988. – 184 с. **ГИАЗ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пучков Лев Александрович – чл.-корр. РАН, профессор,
Каледина Нина Олеговна – доктор технических наук, профессор,
Кобылкин Сергей Сергеевич – кандидат технических наук,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru.