

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ОТ ПОДЗЕМНОГО ПОЖАРА К ПОВЕРХНОСТИ

Портола В.А.¹

¹Юргинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Юрга, Россия (652050, Юрга, ул. Ленинградская, 26), e-mail: portla2@yandex.ru

Рассмотрена возможность перемещения продуктов горения от подземного пожара, возникшего в шахте, к земной поверхности. Проведены математическое моделирование процесса фильтрации газов через горные породы и исследования образования газовых аномалий в почве над пожарами, возникающими в угольных шахтах. Исследования показали возможность образования газовых аномалий в приповерхностном слое, концентрация продуктов горения в которых может быть опасна для человека. Установлено влияние избыточного давления рудничной атмосферы, глубины расположения источника газовой выделенной и проницаемости горных пород на процесс движения газов к земной поверхности. Получены закономерности изменения размеров газовых аномалий в почве и концентрации фильтрующихся газов в зависимости от условий возникшего пожара. Оценена длительность движения продуктов горения от подземного очага к поверхности. Приведены результаты шахтных наблюдений образования аномалий пожарных газов в почве над возникшим в выработанном пространстве пожаром.

Ключевые слова: подземный пожар; продукты горения; шахта; оксид углерода; фильтрация; газовые аномалии; конвективный поток; молекулярная диффузия.

STUDY OF THE MOVEMENT OF PRODUCTS FROM UNDERGROUND FIRE BURNING TO THE SURFACE

Portola V.A.¹

¹Yurga Institute of Technology (branch) of National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia (652050, Yurga, street Leninskaya, 26), e-mail: portola2@yandex.ru

The possibility of moving the products of combustion from an underground fire in the mine to the surface. The mathematical modeling of the gas filtration through rocks and education research in soil gas anomalies over the fires that occur in coal mines. Studies have shown the possibility of formation of gas anomalies in the surface layer, the concentration of combustion products that may be dangerous to humans. The effect of pressure mine atmosphere, the depth of the source of outgassing and permeability of rocks on the process of moving gas to the surface. The regularities resizing gas anomalies in the soil and the concentration of gas filter according to conditions arising from the fire. Estimated duration of the products of combustion from the underground chamber to the surface. The results of observations of mine education anomalies fire gases in the soil over arisen in the goaf fire.

Keywords: underground fire, combustion products; mine, carbon monoxide, filtering, gas anomalies, convective flow, molecular diffusion.

Введение

Анализ аварийности угольных шахт показывает, что большую часть аварий составляют подземные пожары. Только на шахтах Кузбасса ежегодно возникает несколько подземных пожаров экзогенного и эндогенного происхождения [4]. Очаги пожаров, формирующихся в горных выработках и выработанном пространстве, не только наносят большой экономический ущерб предприятиям, угрожают здоровью и жизни людей, но и способны выходить на земную поверхность. Процессу фильтрации продуктов горения от подземного очага пожара к поверхности способствует образование множества трещин в горных породах возникающих после добычи угля и оседания вышележащих слоев пород.

Способствуют переносу пожарных газов к земной поверхности и образованию конвективных потоков воздуха, нагретого в очаге подземного пожара. Повышение температуры газа приводит к снижению их плотности, что приводит к образованию потоков газа к поверхности.

Дополнительным фактором, способствующим и ускоряющим движение продуктов горения из шахты на земную поверхность, может быть избыточное давление воздуха в горных выработках и выработанном пространстве шахт. Применяемые на шахтах способы вентиляции могут быть нагнетательными, всасывающими и нагнетательно-всасывающими. Соответственно, и давление воздуха в шахте может быть избыточным или сниженным по сравнению с давлением воздуха в атмосфере, также равным ему.

Поднимаясь к поверхности, токсичные продукты могут образовывать в почве газовые аномалии и окружающей среды. Выделяясь в атмосферу, пожарные газы могут попасть в жилые и административные помещения, где становятся опасными для людей. Поэтому необходимо исследовать процессы фильтрации газов из шахты к земной поверхности, оценить влияние различных факторов на параметры образующихся газовых аномалий.

Цель исследования

Основным направлением предотвращения самовозгорания угля является снижение его химической активности по отношению к кислороду.

Материал и методы исследования

Исследование переноса газов из очага подземного пожара на поверхность осуществлялось с помощью математического моделирования. Формирование газовых аномалий над подземными источниками газовой выделений происходило в прямоугольной вертикальной проекции горных пород, на верхней границе которой (линия EF), представляющей земную поверхность, поддерживалось постоянное давление (рис. 1). Нижняя граница (линия DC) проведена через источник газовой выделений (точка G). На вертикальных границах DE и CF происходило линейное изменение давления газа. Расчет распределений в горных породах и приповерхностном слое давлений, скоростей перемещения и концентраций газа осуществлялся с использованием следующих уравнений

$$u = -\left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho/V}{l}\right)^{-1} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = -\left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho/V}{l}\right)^{-1} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad V = \sqrt{u^2 + v^2};$$

$$m \frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(m \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(m \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (Cu) - \frac{\partial}{\partial y} (Cv) \right]; \quad P|_{EF} = P_A; \quad P|_D = P_1; \quad P|_C = P_2;$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{DE} = \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{CF} = \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{DC} = 0; \quad P|_{DE} = P_1 + (P_A - P_1) \frac{y}{H};$$

$$P|_{DC} = P_1 + (P_2 - P_1)\frac{x}{L}; \quad P|_{CF} = P_2 + (P_A - P_2)\frac{y}{H}; \quad \frac{\partial C}{\partial y}|_{DC} = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}|_{DE} = \frac{\partial C}{\partial x}|_{CF} = \frac{\partial C}{\partial y}|_{EF} = \alpha_l(C_\alpha - C); \quad C|_G = C_0; \quad C(x, y, \tau = 0) = 0.$$

где v – составляющая вектора скорости по оси x , м/с;

u – составляющая вектора скорости по оси y , м/с;

C – концентрация индикаторного газа в породах;

D – коэффициент диффузии индикаторного газа, м²/с;

L – длина отрезка DC ;

C_0 – концентрация газа в источнике;

α_l – коэффициент массообмена, м⁻¹;

C_l – концентрация исследуемого газа на границе.

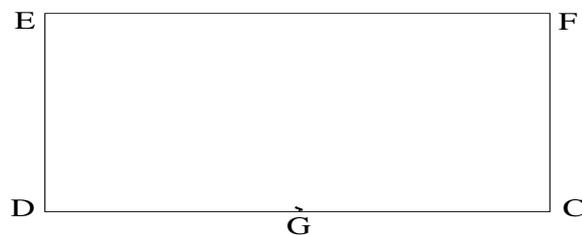


Рис. 1. Формирование газовых аномалий над подземными источниками газовыделений

При расчете уравнений реализован конечно-разностный метод [2, 3, 5, 6]. В массиве горных пород применялась неравномерная пространственная сетка. По данным [1] коэффициент проницаемости деформированных пород над отработанными пластами изменялся в пределах от $5,8 \cdot 10^{-8}$ до $4,1 \cdot 10^{-10}$ м². Путь фильтрации газа составлял от 89 до 174 м, показатель макрошероховатости изменялся от $1,34 \cdot 10^{-9}$ до $7,2 \cdot 10^{-8}$ м.

По результатам расчетов оценивалось время движения газов от очага до поверхности, размеры газовой аномалии на поверхности, концентрация пожарных газов в эпицентре аномалии, а также влияние на эти параметры таких факторов, как глубина очага, проницаемость горных пород, величина избыточного давления в шахте по сравнению с атмосферным давлением на поверхности.

Исследование газовых аномалий, образующихся над очагами подземных пожаров, осуществлялось на шахтах Кузбасса, имеющих очаги пожаров в выработанном пространстве. Для поиска газовых аномалий на поверхности в почве пробивали скважины глубиной 0,5 м и диаметром 15-20 мм. В скважину опускалась газоотборная трубка, через которую пробы воздуха подавались в переносной газоанализатор. Результаты замеров наносили на план поверхности и проводили изолинии концентраций пожарных газов и оценивали параметры газовых аномалий.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты математического моделирования показали, что для выхода пожарных газов от очага до поверхности необходимо несколько часов. Так, в базовой модели при глубине очага 100 м пожарный газ появился на поверхности через 11 часов. Затем газовая аномалия начинает увеличиваться до определенного постоянного размера. Стационарное распределение газа в приповерхностном слое при неизменном газовыделении и поддержании остальных параметров наступает через период, превышающий время движения газа от источника до поверхности в 5-6 раз.

Изменение глубины источника существенно сказывается на характере распределения газа в приповерхностной аномалии. При небольших глубинах (50-100 м) появляется резко выраженный эпицентр с максимальной концентрацией. По мере удаления от этой точки наблюдается быстрый спад концентрации газа (градиент концентрации достигал $0,018 \text{ м}^{-1}$). Увеличение глубины залегания источника приводит к формированию в почве области с плавно изменяющимся, повышенным содержанием выделяющегося газа.

Существенно влияет глубина залегания источника газовой аномалии также на размеры газовой аномалии и отношение максимальной концентрации в аномалии к исходной концентрации выделяющегося газа в источнике. Так, с увеличением глубины источника диаметр газовой аномалии в приповерхностном слое земной поверхности возрастает почти линейно. Одновременно с этим снижается максимальная относительная концентрация газа в эпицентре аномалии. Функциональную зависимость диаметра газовой аномалии и отношения максимальной концентрации выделяющегося газа в аномалии к исходной в источнике можно описать уравнениями

$$D = \exp(0,675 \ln(H) - 0,162);$$
$$C_m/C_0 = 1/(41,91 \cdot 10^{-6}(H)^2 + 0,266 \ln(H)),$$

где D – диаметр газовой аномалии, м;

H – глубина залегания источника газовой аномалии, м;

C_m – максимальная концентрация выделяющегося газа в аномалии, %;

C_0 – концентрация выделяющегося газа в источнике, %.

Значительное воздействие на размеры газовой аномалии и концентрацию в ней газа оказывает коэффициент молекулярной диффузии распространяющегося газа. Описать влияние коэффициента молекулярной диффузии на диаметр аномалии и соотношение максимальной концентрации в почве к начальной в источнике можно уравнениями

$$D = \exp(6,54 \exp(D) + 0,339 \ln(D)) ;$$
$$C_m/C_0 = - 1,759/\exp(D) - 0,22 \ln(D),$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии выделяющегося газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

Из приведенных данных видно, что с ростом коэффициента молекулярной диффузии газа увеличивается диаметр газовой аномалии и снижается концентрация газа в ней. Эти результаты необходимо учитывать при выборе аппаратуры для проведения приповерхностной газовой съемки.

По мере увеличения перепада давления газа между областью с источником газовыделения и атмосферой на поверхности уменьшаются размеры аномалии с одновременным ростом максимальной концентрации газа в приповерхностном слое. Причем существенное сокращение диаметра газовой аномалии происходит при увеличении избыточного давления газа в области источника до 400 Па. Дальнейшее повышение избыточного давления незначительно сокращает размеры аномалии. Зависимость диаметра аномалии и соотношения концентраций газа от перепада давления газа можно описать формулами

$$D = \exp(-0,41 \ln(P_c) + 5,408);$$

$$C_m/C_0 = 1/(280,59/P_c + 1,039),$$

где P_c – перепад давления газа между областью с источником и земной поверхностью, Па. Уменьшению диаметра газовой аномалии способствует увеличение проницаемости горных пород (рис. 2). Концентрация выделяющегося газа в эпицентре аномалии при этом повышается. Влияние проницаемости пород на исследуемые параметры выражается следующими зависимостями

$$D = -63,78 \exp(K) - 3,94 \ln(K);$$

$$C_m/C_0 = \exp(-498,26 \cdot 10^{-12}/K),$$

где K – проницаемость горных пород, м^2 .

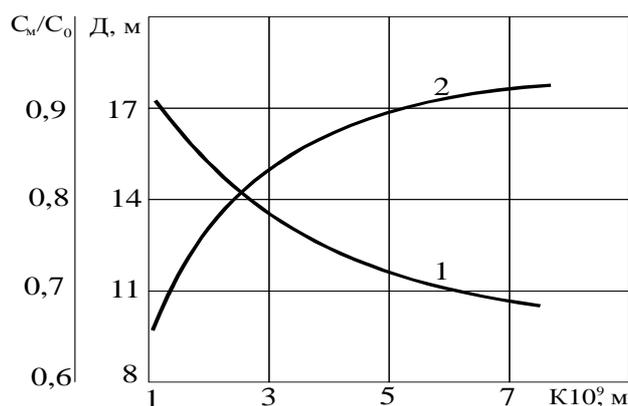


Рис. 2. Зависимость размера аномалии (1) и максимальной относительной концентрации газа в ней (2) от проницаемости горных пород.

Полученные закономерности позволяют оценить влияние отдельных факторов на время движения пожарных газов до поверхности, размеры образующейся газовой аномалии и концентрацию в ней выделяющегося газа. Найденные зависимости помогут прогнозировать

поведение газовых аномалий в случае изменения некоторых параметров. Так, изменение атмосферного давления может увеличить и уменьшить размеры газовой аномалии, концентрацию газов в ней.

Оценка адекватности используемой математической модели и полученных при ее решении выводов осуществлялись на шахте им. Кирова при возникновении пожара, обнаруженного в районе верхнего сопряжения лавы. Особенностью данного пожара является то, что точно было зафиксировано не только местонахождение очага, но и время его возникновения, поэтому появилась возможность сопоставить точность расчетных и фактически замеренных параметров газовых аномалий над очагами подземного пожара.

Открытый огонь был обнаружен рабочими в районе верхнего сопряжения лавы. Перед появлением огня в лаве поступило сообщение о загорании вентилятора, установленного на дегазационной установке. Комиссией по расследованию аварии было высказано предположение, что причиной пожара явилось загорание метана от внешнего теплового импульса, приведшее к воспламенению деревянных стоек и угля.

Проведенные приповерхностные газовые съемки показали, что через двое суток на земной поверхности появились аномалии пожарных газов (окись углерода и водород). Газовые аномалии располагались вдоль погашенного вентиляционного штрека между лавой и дегазационной скважиной (рис. 3а). Данный факт подтвердил предположение, что огонь от вентилятора прошел по метановому шнуру до забоя, вызвав в нескольких местах обгорание деревянной крепи. На момент этой съемки зафиксировано пять аномалий, причем максимальная концентрация пожарных газов зафиксирована в пятне, располагающемся на линии очистного забоя в 20 м от верхнего кутка, что соответствовало месту выхода открытого огня.

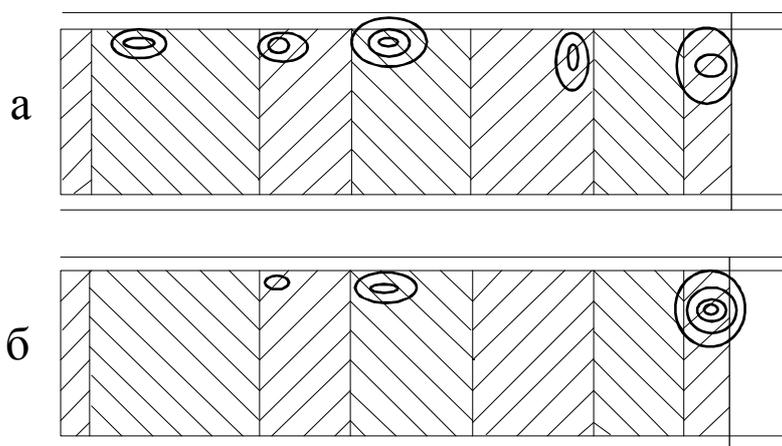


Рис. 3. Расположение аномалий пожарных газов над лавой шахты им. Кирова: а – через двое суток после возникновения пожара; б – через 8 суток

Последующие приповерхностные газовые съемки (рис. 3б) зафиксировали постепенное исчезновение аномалий вдоль штрека при резком увеличении интенсивности аномалии, расположенной на линии забоя, что свидетельствовало о развитии этого очага, поглощавшего весь поступающий кислород. Запоздывание информации позволило в данном случае установить причину и особенности развития аварийной ситуации. Рассмотренный случай и ряд других шахтных исследований подтвердили достоверность результатов о времени движения газов до поверхности, полученных при математическом моделировании. Одновременно удалось установить, что эпицентр образовавшейся в почве газовой аномалии располагается на вертикальной проекции зафиксированного горноспасателями пожара. Диаметр газовой аномалии над очагом составил 36 м.

Таким образом, шахтные исследования подтвердили результаты математического моделирования о появлении газовых аномалий на земной поверхности над очагами подземных пожаров и высокую эффективность обнаружения и локализации очагов подземных пожаров проведением приповерхностных газовых съемок.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Над очагами подземных пожаров на земной поверхности появляется газовая аномалия из пожарных газов, по которой можно определить местонахождение очага.
2. Параметры газовой аномалии в почве зависят от глубины подземного пожара, коэффициента проницаемости горных пород, величины избыточного давления газа в шахте в области очага, концентрации выделяющихся газов и коэффициента их молекулярной диффузии.
3. Наибольшее влияние на размеры газовой аномалии в приповерхностном слое и концентрацию в ней выделяющегося газа оказывает глубина залегания источника.
4. Расстояние между точками замера на поверхности при проведении приповерхностной газовой съемки следует выбирать с учетом глубины залегания источника газовой выделенности. При глубине источника 50-100 м поиск газовых аномалий целесообразно проводить с шагом до 10 м. Это расстояние можно увеличить до 20 м при глубине источника 100-200 м и до 30 м для источников на глубине 200-300 м.
5. Глубину залегания источников газовой выделенности можно ориентировочно определять по размеру газовой аномалии и распределению концентрации выделяющегося газа в ней.
6. При поиске подземных источников, выделяющих одновременно несколько газов в сопоставимых концентрациях, приповерхностную съемку следует проводить, ориентируясь на газ с наибольшим коэффициентом молекулярной диффузии.

Список литературы

1. Бонецкий В.А., Быкова З.С., Гаськов В.В., Джексембинова А.И., Исаенко В.Д., Поликаров А.Г. Аэродинамическая характеристика обрушенных и деформированных пород при отработке сближенных пластов // Предупреждение и тушение подземных пожаров. Повышение безопасности на рудничном транспорте и при взрывных работах. – Прокопьевск: ВостНИИ, 1974. Т. – С. 41–50.
2. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 439 с.
3. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Госэнергоиздат, 1963. – 348 с.
4. Портола В.А., Галсанов Н.Л., Шевченко М.В., Луговцова Н.Ю. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса // Вестник КузГТУ. - № 2. – 2012 г. – С. 44-47.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
6. Саульев В.К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. – 324 с.

Рецензенты:

Козлов В.И., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Иванов Г.В., д.т.н., профессор, директор «Экспертная организация центр экспертизы промышленной безопасности переработки полезных ископаемых», г. Кемерово.