УДК 622.4: 622 822

А.А. Пилипенко
И.Ф. Дикенштейн
(НИИГД «Респиратор»), Донецк
О.Э. Толкачев
Донецкий национальный технический университет, Донецк

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКЗОГЕННОГО ПОЖАРА В ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКЕ

На основе уравнений Навье-Стокса для нестационарных термодинамических явлений представлена замкнутая система дифференциальных уравнений, описывающих экзогенный пожар в тупиковой подготовительной выработке.

Реализация представленной математической модели даст возможность проанализировать поля температур и концентрации пожарных газов в зависимости от температуры в очаге пожара, его месторасположение в призабойном пространстве, состояния теплообмена с боковыми стенками выработки, ее длины и сечения.

Ключевые слова: тупиковая выработка, призабойное пространство, экзогенный пожар, математическая модель, конвективные потоки пожарных газов, поля скоростей, температур, концентраций, теплоемкость, боковые стенки, реакция горения, метан, начальные и граничные условия.

Возрастание газообильности угольных шахт в связи с углублением горных работ и интенсификации выемки угля высокие темпы проходки являются причинами повышенного метановыделения в подготовительные выработки, что делает их одним из самых опасных объектов угольных шахт. В свою очередь возникновение экзогенных пожаров в метанообильных тупиковых выработках сопряжено с потенциальной опасностью взрывов метановоздушных смесей.

Значительная протяженность тупиковых выработок, проводимых буровзрывным способом, усугубляет опасность возникновения пожара и затрудняет возможность его успешной ликвидации в первоначальной стадии.

В соответствии с действующей нормативной документацией (в частности «Правила технической эксплуатации угольных шахт», К., 2006г.) подготовительные забои должны быть защищены:

– автоматическими порошковыми огнетушителями (выработки, проводимые буровзрывным способом).

– автоматическими водяными установками пожаротушения (выработки, проводимые комбинированным способом).

Однако до настоящего времени эти средства не разработаны и не выпускаются.

Для разработки указанных средств пожаротушения необходимо создание математической модели экзогенного пожара, способной с достаточной степенью точности описывать сложные газодинамические и термодинамические процессы, происходящие в объеме тупиковой подготовительной выработки в аварийных условиях.

Реализация такой модели дает возможность получить поле температур, скоростей, концентрации пожарных газов в выработке, что позволит определить оптимальные параметры проектируемых автоматических средств пожаротушения и выбрать их место расположения в призабойном пространстве и по длине выработки.

Исследованию параметров подземных пожаров посвящено много работ, однако имеющие математические модели приводят в основном оценки параметров пожаров, возникающих и развивающихся в горных выработках, проветриваемых за счет общешахтной депрессии. Использование этих моделей для определения параметров пожара в тупиковых выработках зачастую дает необъективные результаты.

Поскольку процесс распространения экзогенного пожара в горной выработке имеет газодинамическую основу, то базой математической модели должна служить система дифференциальных уравнений газовой динамики, в частности, система векторных уравнений Навье-Стокса для химически реагирующего газа, заполняющего объем выработки [1].

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho \vec{u}}{\partial \tau} + (\nabla \rho \vec{u}) \cdot \vec{u} = -\vec{\nabla} \rho + \vec{\nabla}(\mu_{эф} \nabla \vec{u}) + \vec{F} \\ \dfrac{\partial C_p \rho T}{\partial \tau} + (\nabla C_p \rho T) \cdot \vec{u} = \nabla(\lambda_{эф} \vec{\nabla} T) + \sum_{i=1}^{m} q_i R_{q_i} \vec{i} \\ \dfrac{\partial \rho C_\alpha}{\partial \tau} + (\vec{\nabla} \rho D_{\alpha,эф} \cdot \vec{\nabla} C_\alpha) + \eta_\alpha, \alpha = 1...m-1 \\ \dfrac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \rho \vec{u} = 0; P = \rho R T \sum_{\alpha=1}^{m} \dfrac{C_\alpha}{M_\alpha}; \sum_{\alpha=1}^{m} C_\alpha = 1, \end{cases} \tag{1}$$

где τ – время, с;

$\vec{u}$ – вектор скорости, м/с;

ρ – плотность смеси газов, кг/м^3;

Р – давление, Па;

Т – температура газа, К;

C_α – массовая относительная концентрация газообразного компонента α;

M_α – молекулярная масса газообразного компонента α, кг/кмоль;

$\mu_{эф}$ – эффективный коэффициент динамической вязкости, кг/(м.с);

$\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Дж/(кг.К);

C_p – изобарная теплоемкость смеси газов. Дж/(кг.К);

q_i – тепловой эффект i-й гомогенной реакции горения. Дж/кг;

R_α – массовая скорость образования компонента α в результате гомогенных реакций горения, кг/(м^3.с);

η_{q_i} – массовая скорость i-й гомогенной реакции, кг/(м^3.с);

m – число независимых гомогенных реакций горения;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль.К);

$\vec{F}$ – фактор массовых сил, н.

Первое уравнение в системе (1) дает величину и направление вектора скорости газа $\vec{u}$ в горной выработке.

Уравнение теплопроводности позволяет получить поле температур по всему объему тупиковой выработки. Оно описывает перераспределение тепла как за счет теплопроводности и конвекции, так и за счет протекания гомогенных реакций горения, которые могут иметь место в зоне очага пожара и по ходу движения нагретых до высокой температуры пожарных газов в верхнем конвекционном потоке (например, при наличие слоевых скоплений метана).

Уравнение сохранения компонентов (уравнение диффузии) описывает поля концентраций пожарных газов, число которых определяется набором химических реакций, положенной в основу кинетической модели пожара.

Задаемся формой тупиковой выработки в виде полузамкнутого прямоугольного параллелепипеда длиной L, высотой H и шириной B.

Из условий вязкости газа полагаем равенству нулю u_α поверхности выработки касательных составляющих вектора скорости $\vec{u}$.

$$\begin{cases} u(x,0,z,t) = u(x,H,z,1) = u(x,y,B,t) = 0 \\ v(0,y,z,t) = v(x,y,B,t) = 0 \\ w(0,y,z,1) = w(x,0,z,t) = w(x,H,z,t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где u, v, z – компоненты вектора скорости вдоль координатных осей x, y, z.

Будем рассматривать те случаи пожаров, когда очаг находится на некотором удалении от устья выработки, достаточном для выравнивания значений искомых функций, т.е., когда в выходном сечении (x=L) можно положить:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Кроме того, на поверхности тупиковой выработки должны соблюдат ься законы сохранения массы и энергии. С учетом происходящих на поверхности выработки гетерогенных реакций горения запишем:

закон сохранения энергии

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_S + \sum_{j=1}^{n} q_{S,j} u_j = -\lambda_M \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S \quad (4)$$

$$T\Big|_S = T_M\Big|_S$$

– закон сохранения массы

$$\rho D_{\alpha,эф} \cdot \frac{\partial C_\alpha}{\partial n}\Big|_S + (\rho v)_S C_\alpha = u_\alpha \quad (5)$$

$$(\rho v)_S = \sum_{\alpha=1}^{n} u_\alpha ,$$

где λ_M – коэффициент молекулярной теплопроводности горного массива, Дж/(м.с.К);

T_M – температура горного массива, К;

$q_{S,j}$ – тепловой поток j-й гетерогенной реакции горения, Дж/кг;

$u_{S,j}$ – массовая скорость j-й гетерогенной реакции горения, кг/(м^2.с);

$(\rho v)_s$ – массовая скорость вдува газов с поверхности выработки, кг/(м^2.с);

n – число независимых гетерогенных реакций горения;

S – индекс, приписываемый параметрам на поверхности.

Основная система дифференциальных уравнений (1) благодаря наличию членов $\sum_{i=1}^{n} q_i R_{q_i}$ в уравнении теплопроводности и R_α в уравнении диффузии компонентов способна описать процессы в химически реагирующим газом с любым набором химических реакций.

При воспламенении метана в подготовительной выработке процесс его горения описывается следующей идеализированной реакцией:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \tag{6}$$

Предположим, что реакция имеет первый порядок и подчиняется закону Аррениуса. Обозначим индексами «1» – метан, «2» – кислород и «3» – остальные газы. Тогда массовая скорость исчезновения метана и кислорода описывается формулами:

$$R_1 = 0{,}5k\rho C_2 e^{-E/RT} \tag{7}$$

$$R_2 = k\rho C_2 e^{-E/RT} \tag{8}$$

где E – энергия активации, Дж.моль;

k – предэкспоненциальный множитель, с$^{-1}$;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль.К);

T – абсолютная температура, К.

Таким образом, скорость химической реакции лимитируется концентрацией кислорода в атмосфере выработки.

Подставляя (7) и (8) в систему уравнений (1), получим:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho\vec{u}}{\partial\tau} + (\nabla\rho\vec{u})\cdot\vec{u} = -\vec{\nabla}\rho + \vec{\nabla}(\mu_{эф}\nabla\vec{u}) + \vec{F} \\ \dfrac{\partial C_p\rho T}{\partial\tau} + (\nabla C_p\rho T)\cdot\vec{u} = \nabla(\lambda_{эф}\vec{\nabla}T) + qk\rho C_2 e^{-E/RT} \\ \dfrac{\partial\rho C_1}{\partial\tau} + (\vec{\nabla}\rho C_1)\vec{u} = \nabla(\rho D_{1,эф}\vec{\nabla}C_1) - 0.5k\rho C_2 e^{-E/RT} \\ \dfrac{\partial\rho C_2}{\partial\tau} + (\vec{\nabla}\rho C_2)\vec{u} = \nabla(\rho D_{2,эф}\cdot\vec{\nabla}C_2) - k\rho C_2 e^{-E/RT} \\ \dfrac{\partial\rho}{\partial\tau} + \nabla\rho\vec{u} = 0; P = \rho RT\sum_{\alpha=1}^{3}\dfrac{C_\alpha}{M_\alpha}; \sum_{\alpha=1}^{3} C_\alpha = 1, \end{cases} \tag{9}$$

Система дифференциальных уравнений (9) описывает газовую динамику подготовительной тупиковой выработки с учетом реакций горения метана. Граничные условия (2) и (3) остаются без изменения, а условия (4) и (5) принимают более простой вид

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S = -\lambda_M\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S; T_S = T_M \tag{10}$$

$$(\rho_1 v_1)_S C_1 = -\rho_1 D_1 \cdot \frac{\partial C_1}{\partial n}\Big|_S \qquad (11)$$

где ρ_1 – плотность метана, кг/м^3;

D_1 – коэффициент диффузии метана, м^2/с;

v_1 – объемная скорость истечения метана с единицы поверхности подготовительной тупиковой выработки, м^3/(м^2.с).

Выражения (4) и (10) граничные условия IV рода, т.е. закон сохранения энергии на границе раздела сред. Для упрощения заменим его граничным условием III рода.

В этом случае необходимо совместное решение поставленной задачи (9) с задачей прогрева горного массива, которую можно представить в следующем виде:

$$C_M(T)\rho_M(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\lambda_M(T)\frac{\partial T}{\partial x};0 < x < \infty \qquad (12)$$

Начальное условие: T(x,0)=T0 (13)

Граничные условия: $\alpha_k(T_Г - T_S) = -\lambda_M(T)\frac{\partial T}{\partial x};\ T(\infty,0) = T_0;\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=\infty} = 0$ (14)

где $T_Г$ – температура газа, К;

T_0 – начальная температура стенки, К;

ρ_M – плотность массива, кг/м^3;

λ_M – коэффициент теплопроводности горного массива, Дж/(м.с.К);

C_M – теплоемкость горного массива, Дж/(кг.К).

Зависимость теплофизических параметров горного массива можно определить по формулам [2]:

$$\lambda_M(T) = \frac{533}{T} + 0{,}80, \frac{Вт}{м \cdot К}; \qquad (15)$$

$$C_M(T) = 3708 - \frac{1055 \cdot 10^7}{T}, \frac{кДж}{м^3 \cdot К}; \qquad (16)$$

$$\alpha_M(T) = 18{,}5 + 14{,}8u, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}; \qquad (17)$$

Или используя выражение [3] для коэффициента нестационарного теплообмена для призабойной зоны:

$$K_t = 1{,}92 \cdot 10^4 \, Re_{заб}^{0{,}86} \, B^{0{,}31} \qquad (18)$$

где параметр $B = \dfrac{v_{пр} R_0}{\alpha_n}$; $v_{пр}$ – скорость проходки, м/с;

R_0 – радиус эквивалентного круглого сечения выработки, м.

Начальные условия для искомых функций $\rho, \vec{u}, \rho, T, C_\alpha$ определяются конкретными условиями решаемых задач.

Таким образом, в общем, виде сформулирована задача (9) – (18), решение которой позволяет, в частности, получить нестационарное поле температур при пожаре тупиковой подготовительной выработки.

Список литературы

1. Гришин А.М. Математическое моделирование некоторых нестационарных термохимических явлений / А.М. Гришин. – Томск: из-во Томского гос. университета, 1973. – 282 с.

2. Тельной А.П. Теплофизические характеристики осадочных горных пород / А.П. Тельной, В.А. Стукало. – К.: Техника, 1973. – 126 с.

3. Зимин Л.Б. К вопросу теплообмена в призабойных зонах тупиковых горных выработок глубоких шахт / Л.Б. Зимин // Доклады Академии Наук УССР. – Сер. А. – 1976. – №4. – С. 133-137.

Надійшла до редколегії 02.04.2012

А.А. Пилипенко, І.Ф. Дікенштейн, О.Е. Толкачов

НДІГД «Респіратор», Донецьк

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕКЗОГЕННОЇ ПОЖЕЖІ В ТУПИКОВИХ ВИРОБКАХ

На основі рівнянь Нав'є-Стокса для нестаціонарних термодинамічних явищ представлена замкнута система диференціальних рівнянь, що описують екзогенну пожежу в тупиковій підготовчій виробці. Реалізація представленої математичної моделі дасть можливість проаналізувати поля температур і концентрації пожежних газів в залежності від температури в осередку пожежі, його місцерозташування в привибійному просторі, стану теплообміну з бічними стінками виробки, її довжини і перетину.
Ключові слова: тупикова виробка, привибійний простір, екзогенна пожежа, математична модель, конвективні потоки пожежних газів, поля швидкостей, температур, концентрацій, теплоємність, бічні стінки, реакція горіння, метан, початкові і граничні умови.

A.A. Pilipenko, I.F. Dickenstein, O.E. Tolkachev

RIRP «Respirator», Donetsk

MATHEMATICAL MODEL OF EXOGENOUS FIRE IN DEAD EXCAVATIONS

Of the basis of Navier-Stokes equations for unsteady thermodynamic phenomena we presented a closed system of differential equations describing the exogenous fire in a dead excavation.

Implementation of a mathematical model gives the possibility of analyzing the temperature field and concentration of fire gases.

Keywords: dead-end excavation, bottomhole space, exogenous fire, mathematical model, convective flows of fire gases, velocity field, temperature, density, heat capacity, side panels, the combustion reaction, methane, initial and boundary conditions.