

УДК 533

О.Ю. Лукашов

О КОМПЛЕКСНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗА В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

Рассматривается вопрос последовательного использования математических моделей распространения воздушных ударных волн и проветривания горных выработок для комплексного моделирования аварийных ситуаций при взрыве газа в угольной шахте.

Ключевые слова: взрыв газа, ударные волны, авария на шахте, вентиляция шахт, аварийное воздушораспределение, проветривание шахты, газодинамическая модель.

Актуальность и существующие основы

Взрывы газа на угольных шахтах относят к авариям с одними из наиболее тяжелых последствий из возможных в горнодобывающей промышленности. В результате трагедий предприятия несут значительные финансовые убытки, количество жертв и пострадавших колеблется от единиц до сотен человек [1]. Причинами гибели людей в таких авариях становятся баротравмы, механические травмы, термические ожоги, отравления и удушья.

Первые три из перечисленных причин проявляются непосредственно при взрыве, распространении воздушных ударных волн (ВУВ) и воздушных масс. В настоящее время для расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа используется отраслевая методика [2] и специализированный программный комплекс «Ударная волна» [3, 4]. Комплексно вопросы математического моделирования распространения ВУВ в горных выработках рассматриваются в [5, 6], где рассмотрена возможность определять зоны поражения по нескольким факторам, включая избыточное давление и концентрацию токсичных продуктов взрыва (ПВ). Однако, период расчета, охватываемый указанной программой, ограничивается фактором установления воздушных потоков, формируемых ВУВ. В подавляющем большинстве случаев этот период составляет до нескольких десятков секунд. В действительности этим временем существование опасных факторов не ограничивается. После взрыва ПВ начинают распространяться по шахте, в результате чего люди в шахте получают отравления и удушья. При этом динамика и маршруты распространения ПВ определяются исключительно параметрами вентиляционных потоков. С учетом возможного нарушения проветривания шахты при взрыве, длительность процессов распространения ПВ может составлять часы.

Вывод из вышесказанного – для полноценного прогноза развития аварийной ситуации при взрыве в шахте необходимо рассчитывать не только зоны поражения от распространения ВУВ, но и воздушораспределение в некоторый период после этого. Математическая модель для расчета аварийного проветривания шахты должна быть нестационарной, так как распространение ПВ происходит во времени и с изменением концентрации. Кроме того, при взрыве в шахте происходит разрушение вентиляционных и изолирующих сооружений, нормальный режим

проветривания нарушается и на отдельных участках шахты начинает скапливаться метан, создавая угрозу для повторного взрыва.

В качестве основы для расчета аварийного воздухораспределения предлагается взять модель, описанную в [7]. Однако совместно использовать модели из [2] и [7] можно только после определенных доработок – в модель [2] необходимо ввести учет метана, а в модель [7] – учет ПВ.

Расчет распространения ВУВ

В соответствии с [2] для расчета распространения ВУВ на прямолинейных участках выработок используются одномерные уравнения газовой динамики, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии, в правых частях которых учитывается трение и теплообмен воздушного потока со стенками горных выработок. Чтобы учитывать в потоке наличие метана, введем в систему уравнение сохранения массы для этого компонента. Поскольку используется односкоростная однотемпературная модель (метан имеет скорость и температуру воздушно-го потока), данных изменений будет достаточно.

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{CO}} S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{CO}} u S}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{CH}_4} S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{CH}_4} u S}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{\text{тр}} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = q \Pi; \quad (5)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T; \quad (6)$$

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}},$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u D_{\text{экв}}}{\mu}, \quad D_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (7)$$

$$q = \alpha (T_s - T), \quad \text{Nu} = 0,022 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,47} k,$$

$$\text{Pr} = \frac{\rho c}{\lambda_g}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha D_{\text{экв}}}{\lambda_g}, \quad k = 3 \ln(\alpha_F) + 19,0,$$

где t – время; x – координата; ρ – плотность; ρ_{CO} – относительная плотность ПВ; ρ_{CH_4} – относительная плотность CH_4 ; p – давление; T – температура; R – газовая постоянная воздуха; u – скорость; E – полная энергия; S – площадь поперечного сечения канала; Π – периметр канала; $\tau_{\text{тр}}$ – сила трения о стенки канала; q – тепловой поток в стенки канала; c_f – коэффициент сопротивления; Re – число Рейнольдса; $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка канала;

μ – коэффициент динамической вязкости; Nu – число Нуссельта; P_r – число Прандтля; T_s – температура стенки; λ_g – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплообмена; c – теплоемкость; B – поправочный коэффициент.

Аналогичные изменения коснутся системы уравнений, используемых в [2] для расчета течения газа в сопряжениях горных выработок. Введем в эту систему дополнительное уравнение сохранения массы для метана.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 ; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_{CO}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{CO} u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_{CO} v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_{CO} w}{\partial z} = 0 ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_{CH_4}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{CH_4} u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_{CH_4} v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_{CH_4} w}{\partial z} = 0 ; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = 0 ; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = 0 ; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2 + p)}{\partial z} = 0 ; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho E v + p v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho E w + p w)}{\partial z} = 0 ; \quad (14)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad (15)$$

где u – скорость вдоль оси x ; v – скорость вдоль оси y ; w – скорость вдоль оси z .

Начальные условия

Начальные условия для новой математической модели можно также взять из [2] и соответствующим образом изменить, добавив компоненты учета метана:

$$\begin{aligned} p(x, 0) &= \begin{cases} P_b, & x \in \text{зоне взрыва,} \\ P_0, & x \notin \text{зоне взрыва;} \end{cases} \\ T(x, 0) &= \begin{cases} T_b, & x \in \text{зоне взрыва,} \\ T_0, & x \notin \text{зоне взрыва;} \end{cases} \\ u(x, 0) &= U_0(x); \\ \rho_{CO}(x, 0) &= \begin{cases} \rho_{CO}, & x \in \text{зоне взрыва,} \\ 0, & x \notin \text{зоне взрыва;} \end{cases} \\ \rho_{CH_4}(x, 0) &= \begin{cases} \rho_{CH_4}, & x \in \text{зонам скоплений } CH_4 \text{ и взрыва,} \\ 0, & x \notin \text{зонам скоплений } CH_4 \text{ и взрыва.} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

Граничные условия

Граничные условия также будут учитывать наличие метана в воздушных потоках:

в тупиках:

$$u|_{\text{гр}} = 0;$$

на границах с атмосферой:

$$p|_{\text{гр}} = p_{\text{атм}}, \quad \rho|_{\text{гр}} = \rho_{\text{атм}}, \quad \rho_{\text{CO}}|_{\text{гр}} = 0, \quad \rho_{\text{CH}_4}|_{\text{гр}} = 0; \quad (17)$$

на границах сопряжений и прямолинейных участков:

$$M|_{\text{гр}} = M(t), \quad I|_{\text{гр}} = I(t), \quad E|_{\text{гр}} = E(t).$$

Учитывая относительную краткость процесса распространения ВУВ, работа вентиляторов в данной модели учитываться не будет.

Добавление компонентов для метана дает следующие преимущества:

1. В расчетах учитываются перемещения локальных скоплений метана по горным выработкам при распространении ВУВ (при условии, что не было факторов, приводящих к взрыву этих скоплений).

2. Результаты расчета распространения ВУВ могут напрямую быть использованы в качестве исходных данных для расчета воздухораспределения в нестационарной постановке.

Расчет аварийного воздухораспределения

В соответствии с [7] математическая модель воздухораспределения в сети горных выработок в нестационарной постановке включает одномерные уравнения для расчета параметров воздушного потока на прямолинейных участках выработок и нульмерные – в сопряжениях выработок. Для согласования этой модели с моделью распространения ВУВ необходимо добавить учет ПВ. По аналогии с изменениями, описанными выше, для этого будет достаточно ввести в систему [7] одно уравнение сохранения массы для ПВ:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho S u}{\partial x} = \Pi m; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho S c_{\text{CH}_4}}{\partial t} + \frac{\partial \rho S u c_{\text{CH}_4}}{\partial x} = \Pi m; \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho S c_{\text{CO}_2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho S u c_{\text{CO}_2}}{\partial x} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho S u}{\partial t} + \frac{\partial \rho S u^2}{\partial x} + S \frac{\partial p}{\partial x} = -\Pi k c_f \frac{\rho u^2}{2} - S \rho g \sin \alpha; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \rho S \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho S u \left(\varepsilon + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial x} = \Pi m h_m + \Pi q; \quad (22)$$

$$\varepsilon(p, \rho, c) = \frac{\left[c_{\text{CH}_4} C_{\text{VM}} + c_{\text{CO}_2} C_{\text{ВПВ}} + (1 - c_{\text{CH}_4} - c_{\text{CO}_2}) C_{\text{ВВ}} \right] p}{\left[c_{\text{CH}_4} R_m + c_{\text{CO}_2} R_{\text{ПВ}} + (1 - c_{\text{CH}_4} - c_{\text{CO}_2}) R_{\text{В}} \right] \rho}; \quad (23)$$

$$k = 3 \ln(\alpha_F) + 19,0, \quad q = \alpha_T (\theta_{\text{ст}} - T), \quad \alpha_T = \frac{\lambda \text{Nu}}{D_{\text{экв}}}, \quad (24)$$

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}},$$

где x – координата; $R_{\text{в}}, R_{\text{CH}_4}, R_{\text{CO}_2}$ – газовые постоянные воздуха, CH_4 и ПВ; $c_{\text{CH}_4}, c_{\text{CO}_2}$ – концентрации метана CH_4 и ПВ; $C_{\text{вв}}, C_{\text{vm}}, C_{\text{впв}}$ – теплоемкости воздуха, CH_4 и ПВ; m – приток метана, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; k – поправочный коэффициент для c_F ; α_F – аэродинамическое сопротивление.

Общий вид уравнений, используемых для расчета параметров воздушных потоков в узлах, будет следующим:

$$V_q \frac{d\rho_q}{dt} = \sum_i u_{iq} \rho_{iq} s_{iq}; \quad (25)$$

$$V_q \frac{d(c_v T_q \rho_q)}{dt} = \sum_i u_{iq} \rho_{iq} s_{iq} c_p T_q; \quad (26)$$

$$p_q = \left(\sum_k C_{kq} \right) R T_q; \quad (27)$$

$$V_q \frac{dC_{kq}}{dt} = \sum_i u_{iq} C_{kq} s_{iq}. \quad (28)$$

Здесь u_i, ρ_i – скорость и плотность смеси газов в конце i -й выработки, примыкающей к узлу; s_{iq} – площадь поперечного сечения i -й выработки; ρ – плотность смеси газов, осредненная по объему узла; T_q – температура газов в узле; c_p и c_v – теплоемкости при постоянном давлении и объеме; C_{kq} – концентрация k -й компоненты в узле; C_{kq} – концентрация k -й компоненты потока в конце i -й выработки, примыкающей к узлу с номером q ; q – номер узла; V_q – объем узла.

Начальные условия

Начальные условия для расчета воздухораспределения могут быть полностью взяты из результатов моделирования распространения ВУВ. Это возможно потому, что параметры, используемые в обеих моделях, полностью согласованы по параметрам и единицам измерения.

Граничные условия

Граничные условия для описанной выше математической модели будут аналогичны [7] с поправкой на учет ПВ:

на вентиляторе главного проветривания:

$$u = u_{\text{вент}}, \quad c_{\text{CH}_4} = 0, \quad c_{\text{CO}} = 0, \quad T = T_{\text{вент}};$$

в тупиках: $u|_{\text{гр}} = 0$;

на границах с атмосферой:

$$p|_{\text{гр}} = p_{\text{атм}}, \quad \rho|_{\text{гр}} = \rho_{\text{атм}}, \quad \rho_{\text{CO}}|_{2p} = 0, \quad \rho_{\text{CH}_4}|_{\text{гр}} = 0;$$

на границах сопряжений:

$$M|_{\text{гр}} = M(t), \quad I|_{\text{гр}} = I(t), \quad E|_{\text{гр}} = E(t).$$

(29)

Переход от расчета ВУВ к расчету воздухораспределения

Для выполнения комплексного расчета описанные выше модели должны использоваться последовательно с передачей результатов из модели (1) – (17) в модель (18) – (29). Критерием перехода может служить скоростной фактор – максимальная скорость движения воздуха в сети горных выработок после затухания ударных волн не должна превышать 25 м/с. Эта цифра выбрана по следующим соображениям:

1) указанная скорость сопоставима со скоростями воздуха вблизи главных вентиляторных установок;

2) при такой скорости отсутствуют разрывные характеристики в течениях газа, максимальное изменение давления не превышает 375 Па.

Указанные аргументы представляют собой комплекс физических и технологических факторов, имеющих место в реальных производственных условиях.

Вопрос переноса параметров узлов от модели распространения ВУВ к модели проветривания, связанный с различием используемых уравнений (трех- и нульмерных), решается легко – при переходе достаточно пересчитать параметры узлов по граничащим с ними ячейкам ветвей. В последних к этому времени будут найдены результаты расчетов ВУВ. Данный подход возможен в связи с тем, что обе модели полностью согласованы по используемым физическим параметрам.

Метод расчета

Для решения систем уравнений (1)–(15) и (18)–(28) используется метод Годунова. Выбор обоснован тем, что данный метод устойчив к широкому спектру изменений физических параметров рассматриваемой среды. В нашем случае характеристики воздушного потока могут меняться от разрывных в случае ударных волн, до очень гладких на участках со скоростью воздуха порядка 0,1–0,15 м/с. Таким образом предлагаемый метод может использоваться без дополнительной адаптации для расчета как модельных, так и реальных сетей горных выработок.

Заключение

1. Взрыв газа в горной выработке оказывает влияние на вентиляционные процессы в шахте, которые в свою очередь влияют на безопасность нахождения в ней людей. Поэтому, для прогнозирования развития ситуации в шахте при аварии необходимо моделировать не только распространение ВУВ, но и последующее проветривание.

2. Аварийное воздухораспределение после взрыва газа определяется характером разрушений и является переходным процессом, а потому наиболее точно описывается уравнениями газовой динамики в нестационарной постановке.

3. Для возможности непрерывного расчета математические модели распространения ВУВ и воздухораспределения должны быть согласованы по параметрам.

4. Использование предлагаемого подхода позволит в перспективе разработать комплексный инструмент для моделирования ситуации в шахте при взрыве и после него – определить зоны поражения как за счет распространения ВУВ, так и за счет перемещения вредных газов по горным выработкам.

5. На практике моделирование указанных ситуаций может выполняться при составлении планов ликвидации аварии, ведении горноспасательных работ, расследованиях и ретроспективных анализах произошедших аварий, что в целом позволит повысить безопасность горных и горноспасательных работ на угольных шахтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костеренко В.Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 7. С. 368–377.
2. Горбатов В.А. Методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли / В.А. Горбатов, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко, Д.Ю. Палеев и др. // Госгортехнадзор России: Утв. 29.04.04. № АС-04-35/395. М., 2004. 25 с.
3. Лукашов О.Ю. Программный комплекс расчета параметров ударных волн и взрывобезопасных расстояний «Ударная волна» // Доклады VIII Всероссийской научно-технической конференции «Механика летательных аппаратов и современные материалы». Томск, 2002.
4. Палеев Д.Ю. Автоматизация расчёта зон поражения при взрывах метана и угольной пыли в шахтах / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко, О.Ю. Лукашов // Вестник МАНЭБ. 2005. Т. 9. № 9. С. 141–145.
5. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / под ред. И.М. Васенина. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 322 с.
6. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев [и др.]. М.: Издательство «Горное дело»; ООО «Киммерийский центр», 2011. 312 с.
7. Шрагер Э.Р. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Васенин И.М., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Костеренко В.Н. // Компьютерные исследования и моделирование. 2011. Т. 3. № 2. С. 155–165.

Статья поступила 21.10.2014 г.

Lukashov O. Yu. ON AN INTEGRATED APPROACH TO MODELING AN EMERGENCY UNDER A GAS EXPLOSION IN A COAL MINE

The paper proposes the sequential use of two mathematical models for calculating the situation under a gas explosion in a coal mine and immediately after. One model is used to calculate the propagation of air shock waves; the other, for the calculation of the air distribution in the mine workings. Both models are based on a system of gas-dynamic equations in the non-stationary setting. For the interplay, we considered the variant of the initial adaptation of the models in view of the same set of mine air components – explosion products and methane. The proposed approach enables to a more precise forecast of the situation in the mine under the explosion and immediately after it, it affords to identify the areas affected by shock waves and the distributed explosion products. It also permits one to take account the temporary nature of the processes and the possible destruction of ventilation facilities. The practical use of this approach requires the development of a specialized software and its applying in the emergency response plans during the liquidation and accident investigation periods.

Keywords: gas explosion, shock waves, mine accident, mine ventilation, emergency air distribution, gas-dynamic model.

LUKASHOV Oleg Yurievich (Candidate of Physics and Mathematics,
Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, Kemerovo, Russian Federation)

E-mail: olukashov@gmail.com

REFERENCES

1. Kosterenko V.N., Timchenko A.N. Faktory, okazyvayushchie vliyanie na vozniknovenie vzryvov gaza metana i ugol'noy pyli v shakhtakh. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2011, no. 7, pp. 368–377. (in Russian)
2. Gorbato V.A., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N., Paleev D.Yu. i dr. *Metodika gazodinamicheskogo rascheta parametrov vozdukhnykh udarnykh voln pri vzryvakh gaza i pyli*. Gosgortekhnadzor Rossii: Utv. 29.04.04, no. AS-04-35/395. Moscow, 2004. 25 p. (in Russian)
3. Lukashov O.Yu. Programmnyy kompleks rascheta parametrov udarnykh voln i vzryvobezopasnykh rasstoyaniy «Udarnaya volna». *Doklady VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mekhanika letatel'nykh apparatov i sovremennye materialy»*. Tomsk, 2002. (in Russian)
4. Paleev D.Yu., Kosterenko V.N., Lukashov O.Yu. Avtomatizatsiya rascheta zon porazheniya pri vzryvakh metana i ugol'noy pyli v shakhtakh. *Vestnik MANEB*, 2005, vol. 9, no. 9, pp. 141–145. (in Russian)
5. Vasenin I.M. (ed.) *Matematicheskoe modelirovanie goreniya i vzryva vysokoenergeticheskikh sistem*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2006. 322 p. (in Russian)
6. Paleev D.Yu. [i dr.]. *Udar nye volny pri vzryvakh v ugol'nykh shakhtakh*. Moscow, Gornoe delo Publ.; OOO «Kimmeriyskiy tsentr» Publ., 2011. 312 p. (in Russian)
7. Shrager E.R., Kraynov A.Yu., Vasenin I.M., Paleev D.Yu., Lukashov O.Yu. Kosterenko V.N. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov ventilyatsii seti vyrabotok ugol'noy shakhty. Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2011, vol. 3, no. 2. pp. 155–165. (in Russian)