

ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ВЗРЫВОВ СМЕСЕЙ МЕТАНА С ВОЗДУХОМ В ШАХТАХ

Ц. Чжан, В. Ли, Б. Цинь, Ю. Дуань

Государственная лаборатория взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института, 100081 Пекин, Китай, qzhang@bit.edu.cn

Представлен метод оценки опасности взрывов метановоздушных смесей, включающий численное моделирование, теоретический анализ и данные экспериментов.

Ключевые слова: метановоздушные смеси, катастрофы при взрывах, ударная волна, избыточное давление, высокая температура.

ВВЕДЕНИЕ

Взрывы метановоздушных смесей и связанные с ними волны давления служат главными источниками опасностей в подземных угольных шахтах [1]. Взрывы метана изучались многие годы во всем мире. Основное внимание уделялось детонации и переходу дефлаграции в детонацию в метановоздушных смесях, а также соответствующим параметрам, главным образом давлению взрыва и скорости нарастания давления [2–5]. Физические последствия взрыва изучены достаточно хорошо, тем не менее некоторые проблемы остались нерешенными. Одна из них — изменение температуры в зависимости от расстояния, пройденного взрывной волной в выработке угольной шахты.

Из трех моделей реакций смеси метана с воздухом: горение, дефлаграция и детонация — наибольшей скоростью обладает детонация. Основную опасность при взрывах смесей метана с воздухом представляют высокая температура, волна давления и, возможно, токсичные продукты сгорания, такие как оксид углерода. Волна давления может разрушить конструкции в угольной шахте и привести к катастрофе. Более того, поднятая ею угольная пыль в смеси с воздухом может вызвать вторичный взрыв смеси метана с воздухом. Несмотря на высокую значимость последствий взрывов в угольных шахтах, в литературе имеется немного данных по оценке этих последствий. В представленной работе предложена методология оценки эффектов от взрывов смесей ме-

тана с воздухом, включающая численные методы, теоретический анализ и данные экспериментов.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

При проведении численного моделирования использовали коммерческий пакет программ AutoReaGas, метод конечных элементов для динамики жидкостей, подходящий для газовых взрывов и взрывных проблем. Для вычислений принят алгоритм EULER. Область моделирования делили на две части: взрывную, содержащую объем, занимаемый смесью метана с воздухом, и шахтную часть, которая не содержала метана.

Для численного моделирования взрыва метановоздушной смеси использовали следующие уравнения:

— уравнение импульса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где x_i — пространственная координата в направлении i , t — время, ρ — плотность, u — скорость потока, p — давление,

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$, k — турбулентная кинетическая энергия, ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, C_μ — константа модели ($C_\mu = 0.09 \text{ м}^2/\text{с}$), δ_{ij} — дельта-функция Кронекера;

Qi Zhang, W. Li, B. Qin, Yun Duan.

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

— уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

— уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_E \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $E = e + u_i u_i / 2$, e — внутренняя энергия на единицу массы, Γ_E — коэффициент, характеризующий скорость диссипации энергии турбулентного потока;

— уравнение для кинетической энергии турбулентного потока

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

где Γ_k — коэффициент, характеризующий диссипацию турбулентной кинетической энергии.

Скорость диссипации кинетической энергии турбулентного потока записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Γ_ε — коэффициент, характеризующий скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, C_1 и C_2 — константы модели.

Для расчета процессов движения газов, вызванного взрывом, использовали следующие основные уравнения:

— уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (7)$$

— уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, \quad (8)$$

— уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j E)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ

При моделировании рассматривалась следующая геометрия расчетной области. Прямолинейная шахтная выработка имела площадь поперечного сечения 9 м^2 ($3 \times 3 \text{ м}$) и длину $R = 78 \text{ м}$, при этом длина шахтной выработки, занимаемой смесью метана с воздухом, — $R_1 = 39 \text{ м}$. Один конец выработки предполагался закрытым, другой — открытым. Концентрация метана в воздухе, соответствующая наибольшим взрывным параметрам, принималась равной 11 %, что заметно выше стехиометрической концентрации 9.5 % [4]. Источник зажигания помещался вблизи закрытого конца шахтной выработки.

Распределение избыточного давления

Распределение максимального избыточного давления внутри полости с метаном и вне ее, полученное численным моделированием, приведено в табл. 1. Главная цель этой работы — исследовать распространение ударной волны и распределение температуры за пределами части выработки, которая первоначально содержала метановоздушную смесь ($R > R_1$). Как такового, перехода дефлаграции в детонацию из таблицы не видно. В соответствии с результатами численного счета максимальный прирост давления уменьшается с расстоянием и равен $\approx 1.3 \text{ МПа}$ при $R = 78 \text{ м}$. Это указывает на наличие детонации в шахте.

Таблица 1
Зависимость избыточного давления Δp от расстояния R

$R, \text{ м}$	$\Delta p, \text{ МПа}$
35	1.90
50	1.85
75	1.30
110	0.49
170	0.40
230	0.35
290	0.29
350	0.25
410	0.22
470	0.19

Предположим, что m — общая масса метана в шахте, s — ее поперечное сечение. С помощью анализа размерностей максимальное избыточное давление можно представить в виде функции от $m/(sR)$, как показано на рис. 1. Зная переменную $m/(sR)$, из графика можно вычислить максимальное избыточное давление в зависимости от расстояния для случаев, отличающихся от приведенного в этой работе примера. Когда диаметр становится очень маленьким, пламя погасает. По существу, регрессионная кривая на рис. 1 применима только в тех случаях, когда размеры поперечного сечения выработки близки размеру, рассмотренному в этой работе.

Методом наименьших квадратов по данным из табл. 1 получено следующее уравнение:

$$\Delta p = -0.217 + 42.75 \left(\frac{m}{sR} \right) - 1054 \left(\frac{m}{sR} \right)^2 + 9280 \left(\frac{m}{sR} \right)^3. \quad (10)$$

(Регрессионным анализом методом наименьших квадратов получен относительный коэффициент $R_\alpha^2 = 0.999$.)

На практике горение метановоздушных смесей зависит от многих факторов, таких как концентрация метана в воздухе, объем, занимаемый метановоздушной смесью, загроможденность внутри полости, энергия зажигания, место расположения источника зажигания. Взрыв метановоздушных смесей не всегда приводит к детонации.

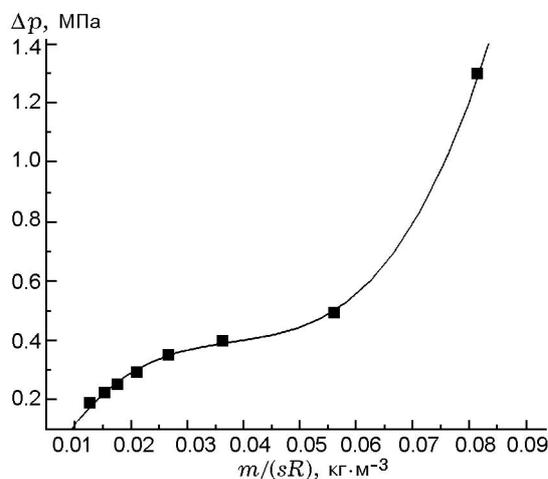


Рис. 1. Зависимость избыточного давления от параметра $m/(sR)$

Распределение температуры

При взрыве метановоздушной смеси наблюдаются два температурных максимума. Один из них — это температура расширяющихся продуктов сгорания, другой — температура в ударной волне.

В той части выработки, которая содержит смесь метана с воздухом, температура расширяющихся продуктов сгорания выше температуры в ударной волне. Но она быстро уменьшается и на удаленных расстояниях становится меньше температуры в ударной волне. Наличие двух температурных максимумов ясно видно и в численных расчетах (см. ниже рис. 2).

На рис. 2 приведена температурная зависимость, полученная численным методом, для случая поперечного сечения выработки площадью 9 м², массы метана 27.6 кг и объемной концентрации метана 11 %. Зависимость имеет два пика. Первый соответствует температуре в ударной волне, второй — температуре расширяющихся продуктов сгорания. На расстоянии $R = 265$ м от источника зажигания (закрытый конец шахтной выработки) температурный пик в ударной волне равен 353 К, а в расширяющихся продуктах сгорания — 415 К. На расстоянии $R = 275$ м температурный пик в ударной волне равен 345 К, а в расширяющихся продуктах сгорания — 340 К. Максимальная температура расширяющихся продуктов сгорания уменьшается быстрее, чем температура в ударной волне. Промежуток времени между температурными пиками порядка нескольких секунд. Горючие смеси угольной пыли с воздухом могут образоваться перед горячими продуктами сгорания, движущимися через это облако пыли. По существу, возможен вторичный взрыв, который будет более разрушительным. Поскольку источником воспламенения угольной пыли может стать поток газа с высокой температурой, необходимо знать распределение температуры в угольной шахте. Изменение температуры на дальних расстояниях от камеры (как показано на рис. 2) может быть использовано для определения возможности воспламенения угольной пыли.

Опасности, связанные с высокими температурами, существуют главным образом в зоне горения и вблизи нее. Поэтому при оценке риска температурным воздействием ударной волны можно пренебречь, но необходимо рассматривать температурное воздействие расширяющихся продуктов сгорания.

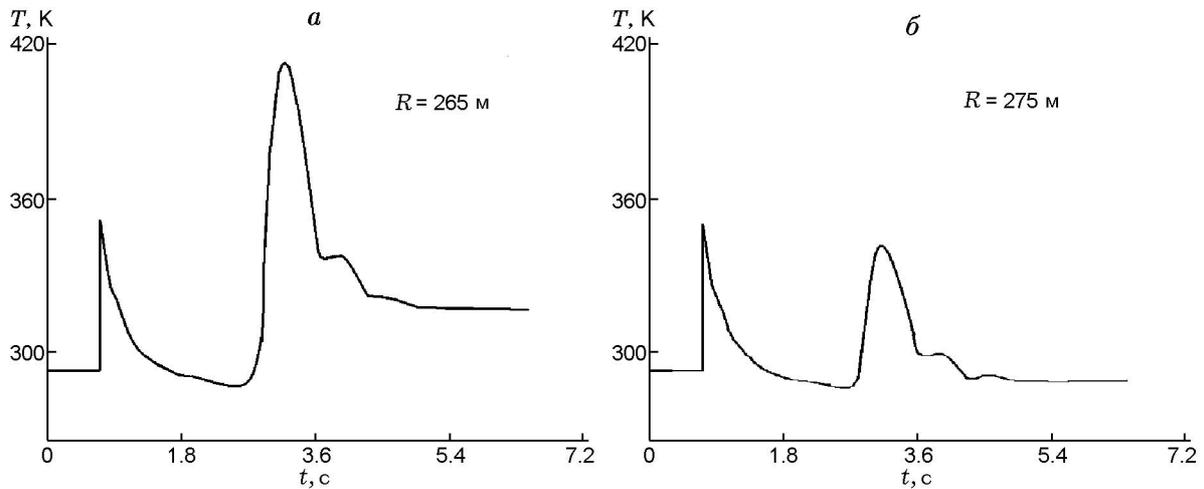


Рис. 2. Зависимость температуры от времени на расстояниях 265 и 275 м ($m = 27.6$ кг)

Численным методом было получено распределение температуры для случая поперечного сечения канала площадью 9 м^2 , массы метана 55.2 кг и объемной концентрации метана 11% . Изменение температуры от расстояния представлено в табл. 2.

Предполагалось, что горючая смесь метана с воздухом находится на первых 78 метрах выработки, измеряемых от ее закрытого конца. Данные в табл. 2 суть температурные максимумы расширяющихся продуктов детонационного превращения смеси метана с воздухом.

Температурный максимум может быть описан функцией $m/(sR)$, как показано на рис. 3. По данным табл. 2 получено следующее уравнение:

$$T_{\max} = -120 + 1120 \cdot 10^2 \left(\frac{m}{sR} \right) - 1815 \cdot 10^3 \left(\frac{m}{sR} \right)^2 + 1032 \cdot 10^4 \left(\frac{m}{sR} \right)^3. \quad (11)$$

(Регрессионным анализом получен относительный коэффициент $R_\alpha^2 = 0.989$.)

Уравнение (11) может быть использовано для вычисления распределения максимальной температуры для $R > 78$ м. Необходимо отметить, что уравнение (11) применимо только в случае, когда поперечное сечение выработки близко к сечению, рассматриваемому в этой работе.

Таблица 2
Зависимость максимальной температуры от расстояния R

$R, \text{ м}$	$T, \text{ К}$
80	2450
110	2300
170	2000
230	1760
290	1550
350	1390
410	1260
470	955

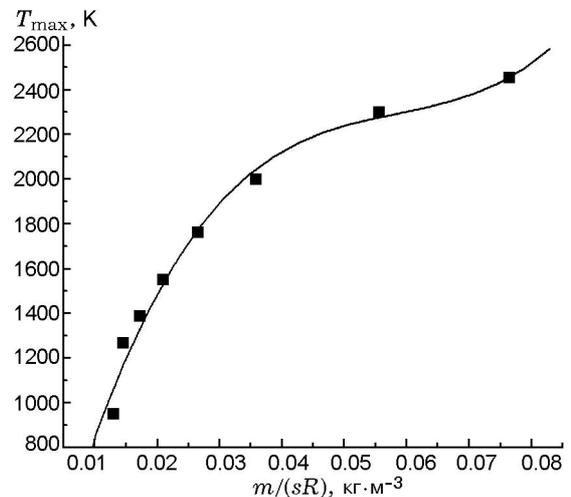


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от параметра $m/(sR)$

Температура пламени уменьшается с расстоянием за пределами области с метановоздушной смесью. В конце процесса горения температура распространяющегося пламени имеет наименьшее значение. Вне области с метановоздушной смесью пламя не распространяется. Если наименьшая температура распространяющегося пламени в смесях метана с воздухом известна, то из уравнения (11) можно определить область распространения пламени в метановоздушных смесях в шахте.

Наименьшую температуру пламени можно также определить из предельных условий его распространения. Но возможны и вычисления с использованием теории минимума свободной энергии для детонационного режима. Мы считаем, что значения, полученные из теории минимума свободной энергии, не соответствуют реальному случаю, потому что перед окончанием процесса горения режим реакции не является детонационным. Кроме того, здесь наименьшая температура пламени соответствует данной концентрации, а не нижнему пределу. Наименьшее значение температуры пламени определялось на установке, схема которой представлена на рис. 4. Инерционность системы измерения температуры менее 10 мкс, диапазон измерения температуры хромель-алюмелевыми термопарами $273 \div 1623$ К. Использовались термопары типа E12-3-C-U фирмы NANMAC.

В экспериментах объемная концентрация метана составляла 9.5 %. При численном моделировании концентрация метана в воздухе, соответствующая более жестким параметрам

взрыва, заметно превышала стехиометрическую концентрацию 9.5 %. Именно поэтому мы использовали в экспериментах стехиометрические смеси, тогда как моделирование проводилось для смеси 11 % метана с воздухом.

Температура пламени определялась термодинамическим расчетом и экспериментально. В экспериментах использовался закрытый сосуд внутреннего диаметра 199 мм, высотой 160 мм, объемом 5 л. Измеренная температура является наименьшей температурой пламени, потому что переход дефлаграции в детонацию в этих сосудах невозможен, а метановоздушная смесь поджигалась минимальной энергией. Наименьшую температуру находили путем изменения энергии зажигания. При энергии зажигания менее 0.215 Дж метановоздушная смесь внутри сосуда не воспламенялась. При энергии зажигания 0.215 Дж измеренная температура пламени равна 1473 К, и это значение принято в качестве наименьшего значения температуры. Экспериментальная зависимость давления от времени показана на рис. 5. Из анализа наших экспериментов следует, что зажигание, сильное или слабое, существенно влияет на параметры взрыва горючего газа, особенно в непосредственной близости от точки зажигания. Иногда горючий газ при данной энергии зажигания не реагирует, но может реагировать при более высоких ее значениях.

Естественно, что условия в закрытом сосуде, использованном в экспериментах в этой

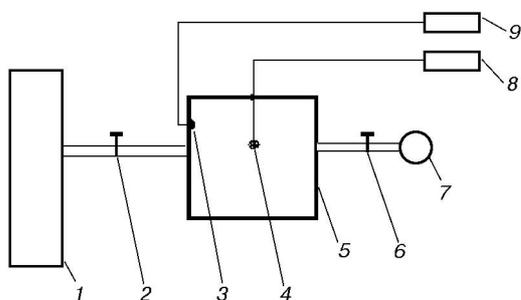


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — баллон с метаном, 2 — регулирующий клапан, 3 — датчик температуры, 4 — источник зажигания, 5 — реактор, 6 — регулирующий клапан, 7 — измеритель концентрации метана, 8 — блок управления зажиганием, 9 — система сбора и анализа данных

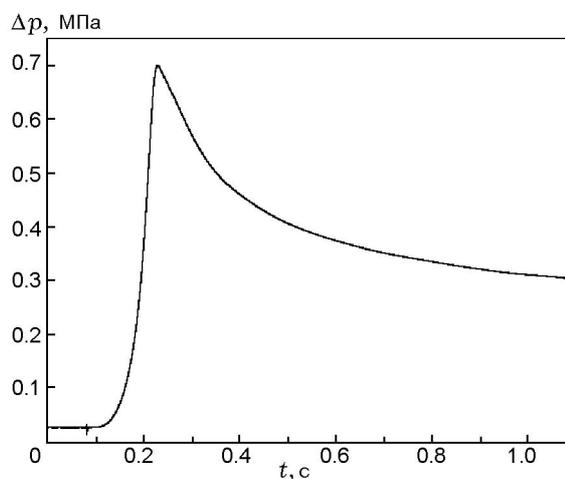


Рис. 5. Экспериментальная зависимость избыточного давления от времени при горении в закрытом сосуде

работе, отличаются от условий в шахтных выработках. Метановоздушная смесь в закрытом цилиндрическом сосуде внутреннего диаметра 199 мм и высотой 160 мм никогда не будет способна к детонации. Принимая температуру 1473 К, измеренную в закрытом сосуде, в качестве наименьшей, получаем, что температура пламени к концу сгорания смеси метана с воздухом в шахте должна быть принята примерно такой же — 1473 К. Подставляя $T_{\max} = 1473$ К в уравнение (11), находим размер области распространения пламени в шахтной выработке с метановоздушной смесью. Он равен приблизительно 340 м в случае, когда масса метана 55.2 кг, площадь сечения выработки 9 м² и исходная смесь занимает 78 м в шахтной выработке. В этом случае отношение найденного размера к исходной длине участка с метановоздушной смесью равно 4.4. Полученные оценки хорошо согласуются с данными экспериментов [6]. Экспериментальные условия в [6] те же, что и принятые для моделирования в настоящей работе. В экспериментах с метановоздушными смесями в реальной шахтной выработке максимальное отношение размера области с метановоздушной смесью к концу ее сгорания к первоначальному размеру области, занимаемой метаном, равно 5.7 [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К опасностям, вызванным взрывами смеси метана с воздухом, относятся высокая температура, волна давления (удар) и, возможно, токсичные продукты сгорания. В статье представлена методология оценки опасных эффектов от взрывов смесей метана с воздухом, находящихся в шахтной выработке. В плане предотвращения взрыва, если исходить из предположения, что смесь детонирует, полученный оценочный результат является более достоверным и надежным по сравнению с оценкой, базирующейся на предположении дефлаграционного сгорания смеси.

Уравнение (10) применимо для оценки избыточного давления в ударной волне в смесях метана с воздухом в шахтной выработке с закрытым концом. Полученное из уравнения (10) избыточное давление соответствует детонационному режиму сгорания этих смесей. Если в шахтной выработке реализуется дефлаграционный или быстрый режим сгорания, то оценка избыточного давления выше реальных зна-

чений. Но реальные значения не могут быть выше оценок, сделанных по уравнению (10).

Температурное воздействие включает две составляющие — это высокая температура в ударной волне и высокая температура расширяющихся продуктов сгорания. Вблизи зоны горения температура расширяющихся продуктов сгорания выше температуры в ударной волне. Временной интервал между пиками температуры в ударной волне и в продуктах сгорания составляет несколько секунд в середине и на далеких расстояниях от реакционной зоны. Высокая температура расширяющихся продуктов сгорания является главным фактором иницирования вторичных взрывов, но она быстро уменьшается с расстоянием. Если площадь поперечного сечения выработки и масса метана известны, то температурные пики расширяющихся продуктов сгорания в любой точке внутри выработки могут быть найдены с помощью предложенного метода.

Размер области распространения пламени в шахтной выработке с метановоздушной смесью является важным параметром в оценке безопасности. Его можно определить с помощью уравнения (11) при использовании подхода наименьшей температуры пламени.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Фонд естественных наук Китая (the Nature Science Foundation of China, 10772029).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Msiza D. M.** The review of the flammable gas and coal dust explosions // *J. Min. Vent. Soc. S. Afr.* — 2003. — V. 56, N 3. — P. 119–122.
2. **Gieras M., Klemens R., Rarata G., Wolanski P.** Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40dm³ at normal and elevated temperature // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2006. — V. 19, N 2–3. — P. 263–70.
3. **Kobiera A., Kindracki J., Zydak P., Wolanski P.** A new phenomenological model of gas explosion based on characteristics of flame surface // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2007. — V. 20, N 3. — P. 271–280.
4. **Pekalski A. A., Schildberg H. P., Smallegange P. S. D., Lemkowitz S. M., Zevenbergen J. F., Braithwaite M., Pasman H. J.** Determination of the explosion behaviour of methane and propene in air or oxygen at standard and elevated conditions // *Process Saf. Environ. Protect.* — 2005. — V. 83, N 5. — P. 421–429.
5. **Van den Schoor F., Norman F., Verplaetsen F.** Influence of the ignition source location

on the determination of the explosion pressure at elevated initial pressures // J. Loss Prev. Process Ind. — 2006. — V. 19, N 5. — P. 459–62.

6. **Xu J. D., Xu S. L., Yang G. Y.** Experimental study on mine gas explosion diffusion // Coal Sci. Technol. (in Chinese). — 2004. — V. 32, N 7. — P. 55–57.

*Поступила в редакцию 21/VIII 2009 г.,
в окончательном варианте — 23/III 2010 г.*
