

А. А. КОМАРОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: bzbb@mail.ru)

Г. В. ВАСЮКОВ, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры экологической безопасности Академии ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: gl-v@yandex.ru)

Р. А. ЗАГУМЕННИКОВ, адъюнкт Академии ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: r-unk@yandex.ru)

Е. В. БУЗАЕВ, аспирант Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: buzaevgen@mail.ru)

УДК:614.835.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОМЕЩЕНИЯХ

В настоящее время достаточно подробно изучено сгорание заранее перемешанных метановоздушных смесей, которые в реальных авариях, как правило, не образуются. Рассмотрен вопрос формирования газовой смеси в помещении. С помощью экспериментальных исследований и математического моделирования процесса турбулентной диффузии установлены закономерности формирования метановоздушной смеси внутри помещений. Определен минимальный коэффициент турбулентной диффузии при отсутствии подвижности воздуха и температуре 25 °С в помещении. Показано, что используемая численная модель позволяет вычислить объем газа во взрывоопасном состоянии.

Ключевые слова: утечка газа; взрывоопасное облако; турбулентная диффузия; метановоздушная смесь; избыточное давление.

При проектировании промышленных объектов нефтегазовой отрасли возникает проблема обеспечения их взрывоустойчивости [1–4]. Основным фактором, который способствует разрушению здания при взрыве, является избыточное давление. Оно возникает вследствие быстрого и значительного (в 7–8 раз) расширения продуктов сгорания относительно исходной смеси [5]. Для оценки избыточного давления взрыва существует много различных подходов. В большинстве из них закладывается наиболее опасный сценарий, когда весь объем помещения заполнен газовой смесью стехиометрической концентрации. Анализ пожаровзрывоопасности метана представлен в работе [6]. При реальных аварийных утечках в помещениях в большинстве случаев такая смесь не образуется, а если и образуется, то не является стехиометрической. Работа выполнена в продолжение исследований [7, 8]. Задачей настоящей работы являлось определение закономерностей распространения в помещении метана как наиболее распространенного горючего газа.

Экспериментальные исследования

Авторами статьи были проведены экспериментальные исследования, направленные на выявление

закономерностей формирования взрывоопасных зон в помещениях, в 2013 г. (эксперимент № 1) и 2014 г. (эксперимент № 2). Это важно для оценки пожарной опасности помещений, где используются горючие газы [9], принятия управленческих решений при ликвидации последствий взрывов газа, а также при расследовании таких аварий [10–12].

Экспериментальная модель представляла собой установленную вертикально полиэтиленовую трубу с внутренним диаметром 105 мм, высотой 4500 мм и объемом 39 л. Метан подавался в нижний торец (заглушку), выполненный из фанеры толщиной 20 мм с уплотнением в месте вставки в трубу. Патрубок представлял собой полиэтиленовую трубку с внутренним диаметром 10 мм, заполненную на 10 мм пористым материалом для исключения формирования струи на срезе. Данная модель установки рассматривалась как часть помещения, ограниченная стенками трубы, на которых выполнялось условие непротекания жидкости. Схема модели установки представлена на рис. 1.

Внутри модели вдоль центральной оси были установлены оптические датчики концентрации углеводородов с порогом измерения до 100 % (об.) метана. Сбор данных производился через аналого-цифровой

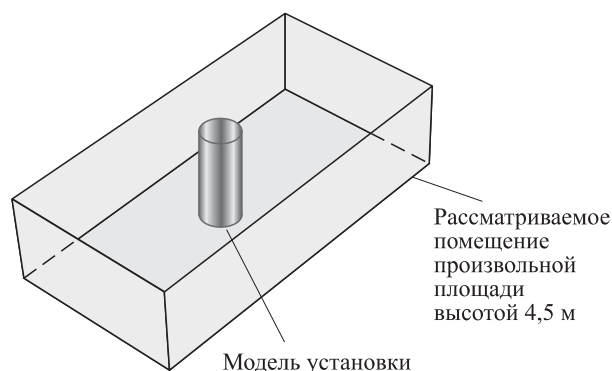


Рис. 1. Схема экспериментальной модели

Таблица 1. Размещение датчиков на высоте от нижнего торца

Датчик	Высота, мм	
	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2
Нижний № 1	3300	1500
Средний № 2	3700	3000
Верхний № 3	4100	4500

преобразователь (АЦП) с выводом их на компьютер для регистрации и последующей обработки. Все оборудование было откалибровано по метану, выходное напряжение имело линейную характеристику, что гарантировало достоверность измерений. Датчики располагали следующим образом (см. табл. 1).

Заполнение модели метаном осуществляли с помощью ручного поршневого насоса известного объема, что обеспечивало подачу фиксированного объема газа. В эксперименте № 1 объем метана составлял 4,5 л, или 11,5 % от общего объема трубы (39 л). Время регистрации данных 3600 с. Данные, полученные с датчиков концентрации, представлены на рис. 2.

Из полученных графиков видно, что до 500-й секунды концентрация на заданных высотах растет со скоростью: датчик № 3 — 0,71 % (об.)/мин, № 2 — 0,83 % (об.)/мин, № 1 — 0,95 % (об.)/мин. Затем, достигнув своих максимумов: датчик № 3 — 6,5 % (об.), № 2 — 6,4 % (об.), № 1 — 6,6 % (об.), она начинает снижаться и через 1100 с пересекается в точке с концентрацией 6,4 % (об.), после чего равномерно падает со скоростью 0,026 % (об.)/мин. Предположительно, в установке в месте вставки нижней заглушки в торец модели при вводе кабелей к датчикам осталось небольшое отверстие, через которое происходила утечка метана из внутреннего объема модели. Из-за этого не происходило выравнивания до среднеобъемной концентрации 11,5 %.

В эксперименте № 2 объем метана составлял 3,6 л, или 9,2 % от общего объема трубы. Данные, полученные с датчиков концентрации, представлены на рис. 3.

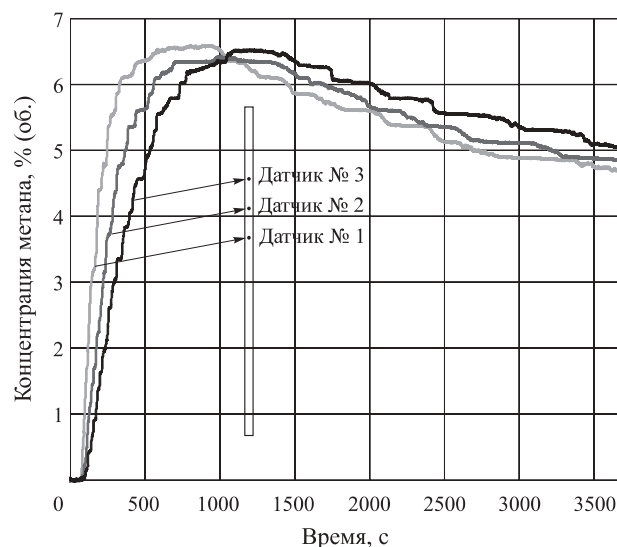


Рис. 2. Экспериментальные данные с датчиков концентрации (эксперимент № 1)

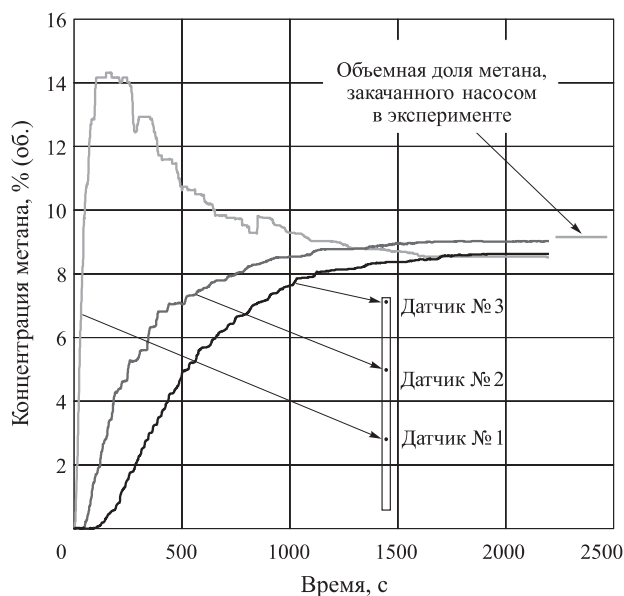


Рис. 3. Экспериментальные данные с датчиков концентрации (эксперимент № 2)

В данном опыте наблюдается несколько другая картина, чем в эксперименте № 1. На нижнем датчике концентрация метана возрастает до 14,2 % (об.), что выше среднеобъемной концентрации (9,2 % (об.)). Согласно показаниям среднего (№ 2) и верхнего (№ 3) датчиков концентрация растет более плавно. Примерно на 2000-й секунде показания со всех датчиков выравниваются до среднеобъемного значения 9,2 % (об.) для равномерно перемешанной смеси. Дальнейшего изменения показаний с датчиков не наблюдается. На основе опыта подобных исследований [13, 14] был сделан вывод о герметичности модели. Стоит особо отметить превышение показаний среднеобъемной концентрации для нижнего (№ 1) датчика, начиная с 45-й секунды.

Математическое моделирование экспериментов

Было проведено математическое моделирование экспериментов с целью описания наблюдаемых в них процессов. Моделирование выполнялось методом численного интегрирования уравнения диффузии (второй закон Фика) в двухмерной постановке [15, 16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial Q}{\partial V},$$

где $C(x, z, t)$ — объемная концентрация вещества в смеси, % (об.);

D_x, D_z — коэффициенты турбулентной диффузии для различных направлений, $\text{м}^2/\text{с}$;

Q — объемный расход вещества, $\text{м}^3/\text{с}$;

x, z — координаты, м;

t — время, с;

V — объем, м^3 .

Для расчета использовалась двумерная расчетная область, представляющая собой сечение внутренней области трубы вдоль центральной оси по ее

диаметру шириной 105 мм и высотой 4500 мм. Рассматриваемое сечение разделялось на 2100 квадратных ячеек с ребром 15 мм: 7 — по горизонтали и 300 — по вертикали. Источник метана задавался числовым значением 100 в ячейках, соответствующих первоначальному месту нахождения метана, свободные ячейки, занятые воздухом, — числовым значением 0. Количество заполненных метаном ячеек определялось исходя из доли газа, подаваемого в эксперименте, от общего объема трубы. Для эксперимента № 1 она составляла 11,5 %, т. е. 240 ячеек, для эксперимента № 2 — 9,2 %, т. е. 190 ячеек. Источник газа в эксперименте № 1 располагался в ячейках (2–6; 1–48), эксперименте № 2 — (2–6; 1–38) (рис. 4).

На границах расчетной области принималось условие непротекания жидкости: $\partial C / \partial n = 0$ (где n — нормаль к границе). В эксперименте № 1 в ячейках (1; 1) и (1; 7) задавался расход утечки, пропорциональный суммарному потоку в эти ячейки, уменьшенному в 500 раз. Предполагалось, что газодинамические потоки, связанные с процессом заполнения модельной установки метаном с помощью ручного

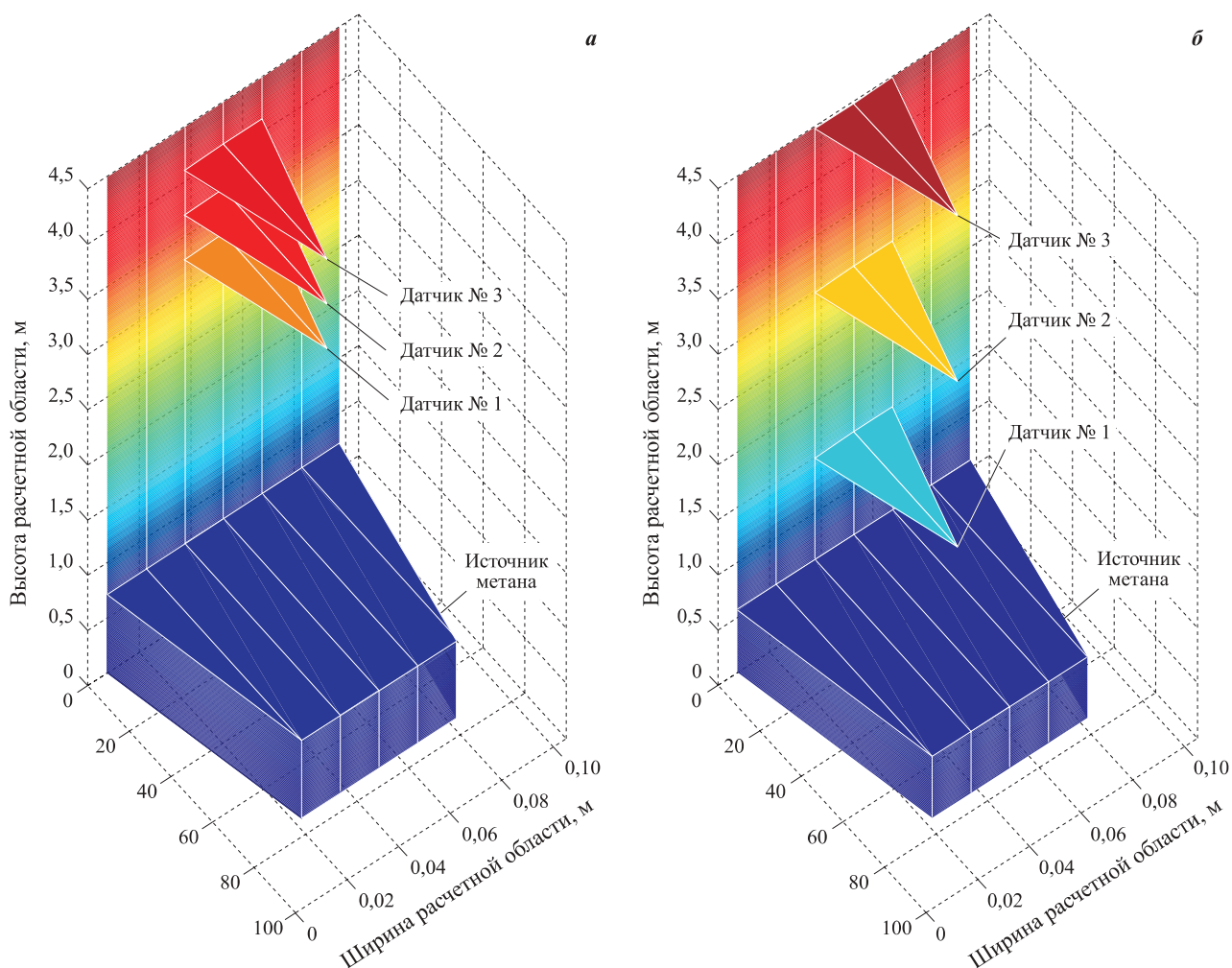


Рис. 4. Расчетные области для моделирования диффузии метана в экспериментах № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица 2. Координаты датчиков концентрации в расчетах

Датчик	Координаты датчиков	
	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2
Нижний № 1	4; 220	4; 100
Средний № 2	4; 247	4; 200
Верхний № 3	4; 274	4; 300

насоса, отсутствуют, и струйными течениями мы пренебрегали. Для возможности сопоставления экспериментальных и расчетных данных был реализован вывод зависимости концентрации от времени в ячейках, соответствующих фактическому расположению датчиков в трубе (табл. 2).

Коэффициент турбулентной диффузии подбирался так, чтобы показания датчиков в экспериментах совпадали с расчетными зависимостями в ячейках вывода концентраций из расчетной области. Так как калибр трубы был намного меньше, чем ее линейный размер ($4500:105 = 42,9$), этот коэффициент

в горизонтальном направлении оказывал малое влияние на процесс рассеивания метана, поэтому значения коэффициента по вертикали и по горизонтали были приняты равными. Он подбирался таким образом, чтобы выравнивание концентрации на всех датчиках в эксперименте № 1 происходило через 1100 с, в эксперименте № 2 — через 2000 с. Значение, обеспечивающее наилучшую сходимость экспериментальных и расчетных данных, для обоих случаев составило $D_x = D_z = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Оно и было принято для расчета.

Полученные расчетные зависимости объемных концентраций от времени в ячейках вывода в экспериментах № 1 и 2 представлены на рис. 5.

Для оценки последствий взрыва важным параметром является количество газа, находящегося во взрывоопасном состоянии. Так, возможно образование локальной взрывоопасной области, однако благодаря рассеиванию газа с течением времени его концентрация будет снижаться до взрывобезопасной, и тогда взрывные нагрузки будут зависеть от времени воспламенения [17–19]. Измерить количество газа внутри области воспламенения достаточно сложно, а зачастую просто невозможно, поэтому с помощью численного метода был найден общий объем газа внутри расчетной области и его количество во взрывоопасном состоянии. Расчет производился суммированием объемов газа в ячейках при условии нахождения их концентраций между нижним и верхним пределами воспламенения (рис. 6).

В принятой в настоящее время методике категорирования помещений по взрывопожарной и пожарной опасности в [20, 21] приведено выражение для определения избыточного давления:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{mZ}{V_{\text{св}} \rho_{\text{г.п}}} \frac{100}{C_{\text{ст}}} \frac{1}{K_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $P_{\max}$ — максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической газовойоздушной или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа;
 P_0 — начальное давление, кПа;
 m — масса горючего газа, вышедшего в результате расчетной аварии в помещение, кг;
 $V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, м^3 ;
 Z — коэффициент участия горючего во взрыве, характеризующий отношение объема газа во взрывоопасном состоянии ко всему объему газа, поступившего в помещение;
 $\rho_{\text{г.п}}$ — плотность газа или пара, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $C_{\text{ст}}$ — стехиометрическая концентрация горючего газа, % (об.);
 $K_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения.

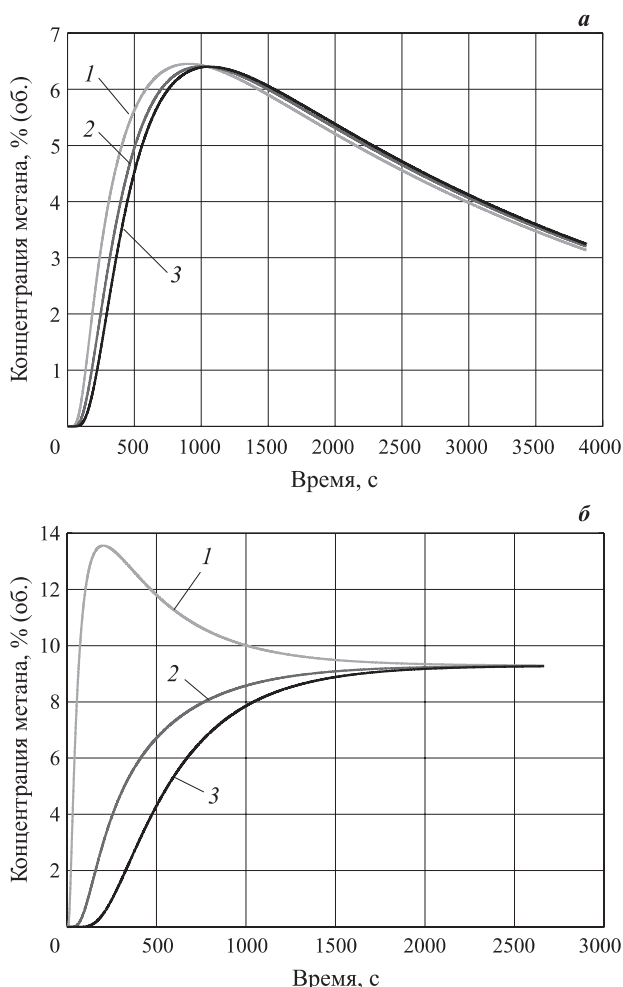


Рис. 5. Расчетные зависимости объемных концентраций в ячейках вывода от времени в экспериментах № 1 (а) и № 2 (б): 1 — нижний датчик № 1; 2 — средний датчик № 2; 3 — верхний датчик № 3

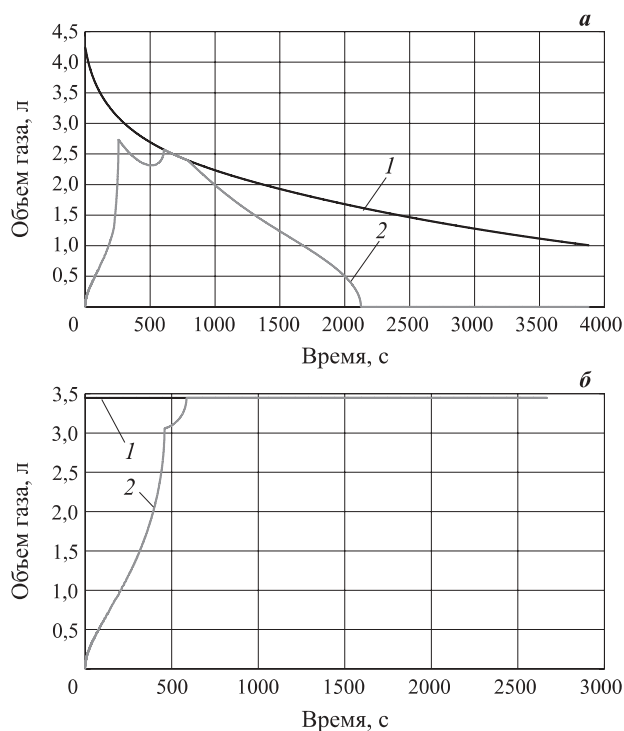


Рис. 6. Изменение объема газа в трубе общего (1) и во взрывоопасном состоянии (2) в течение времени моделирования в экспериментах № 1 (а) и № 2 (б)

С помощью нашей расчетной схемы мы получили изменение Z с течением времени в эксперименте № 1 (рис. 7). Как видно из графика, на 600-й секунде весь газ, находящийся внутри модели, перешел во взрывоопасное состояние, а через 2100 с с момента поступления полностью диффундировал до взрывобезопасной концентрации.

Стоит отметить некоторые соотношения, используемые при математическом моделировании. Модель имела круглое сечение, поэтому для приведения рассчитываемого объема (см. рис. 6) к его форме применялись следующие выражения:

- для общего количества газа $V_{\Gamma}^{\text{общ}}$ (м³):

$$V_{\Gamma}^{\text{общ}} = \frac{\sum_{i,k=1}^{n_x, n_z} C_i}{100x_0^2 D_{\text{тр}} \pi / 4}; \quad (2)$$

- для общего количества газа во взрывоопасном состоянии $V_{\Gamma}^{\text{в-оп}}$ (м³):

$$V_{\Gamma}^{\text{в-оп}} = \frac{\sum_{i,k=1}^{n_x, n_z} C_i^{\text{в-оп}}}{100x_0^2 D_{\text{тр}} \pi / 4}, \quad (3)$$

где C_i — концентрация газа в i -й ячейке, % (об.);
 x_0 — размер ребра ячейки, м;
 $D_{\text{тр}}$ — диаметр трубы, м;
 $C_i^{\text{в-оп}}$ — концентрация газа в i -й ячейке между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения, % (об.).

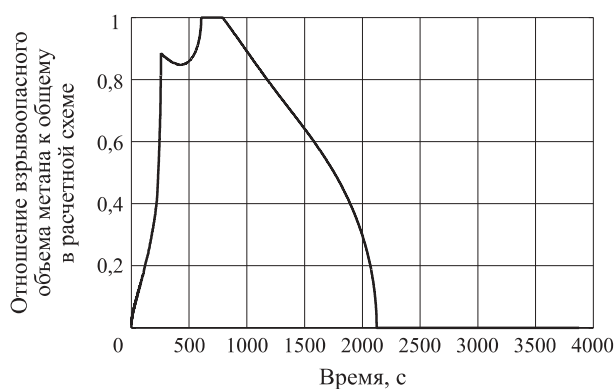


Рис. 7. Изменение объемной доли метана во взрывоопасном состоянии в течение времени моделирования в эксперименте № 1

Тем не менее в расчетах наблюдаются некоторые погрешности, вызванные тем, что применялась двухмерная модель. Из рис. 6 видно, что объем газа, полученный в эксперименте, несколько ниже, чем фактический. Данный недостаток можно устранить использованием трехмерной численной модели с учетом геометрии экспериментальной трубы.

В заключение следует отметить, что процесс рассеивания газа в воздухе сам по себе является достаточно сложным. Некоторые особенности процесса формирования взрывоопасных зон для различных газов рассмотрены в работах [22–27]. Он осложняется отличием плотности горючих газов от плотности воздуха (метан практически в 2 раза легче, поэтому его условно считают “легким газом”), наличием газодинамических явлений и т. п. Тем не менее, исключив влияние газодинамических потоков, можно достоверно определить поля концентрации, размеры зоны загазованности (со взрывоопасной концентрацией газа), образующейся только в процессе турбулентной диффузии, что наглядно показано в данной работе и подтверждено экспериментальными данными.

Выводы

1. Используемая математическая модель достаточно точно описывает процесс распределения метана в помещении и дает представление о физике процессов формирования взрывоопасной смеси в помещении при утечке метана.

2. Предлагаемый метод экспериментального измерения и последующего расчета процессов распределения горючих газов в помещениях дает возможность косвенно определять коэффициент турбулентной диффузии на основе значений концентраций газа в точках измерения.

3. Предлагаемая методика позволяет определять взрывоопасное количество газа в объеме помещения в различные моменты времени, что во многом определяет избыточное давление взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишуев А. В., Казеннов В. В., Хуснутдинов Д. З. Взрывная опасность для АЭС, запроектированных и построенных в России без учета взрывной опасности // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 7. — С. 21–25.
2. Мишуев А. В., Казеннов В. В., Громов Н. В. Обеспечение взрывобезопасности и взрывоустойчивости промышленных, транспортных, энергетических и гражданских объектов // Вестник МГСУ. — 2011. — Вып. 1, т. 2. — С. 336–340.
3. Мишуев А. В., Казеннов В. В., Громов Н. В., Лукьянов И. А., Прозоровский Д. В., Бажина Е. В. Проектирование остекления зданий с учетом требований по взрывоустойчивости и взрывобезопасности // Вестник МГСУ. — 2010. — Вып. 4, т. 2. — С. 51–55.
4. Мишуев А. В., Казеннов В. В., Гусак Л. Н. Взрывозащита зданий // Пожаровзрывобезопасность. — 2004. — Т. 13, № 6. — С. 24–25.
5. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского, А. Я. Корольченко. — М. : Пожнаука, 2000. — 482 с.
6. Загуменников Р. А. Недостатки современной оценки пожаровзрывоопасности метана // Сб. ст. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием “Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций”, 19 апреля 2013 г. — Воронеж, 2013. — С. 361–363.
7. Васюков Г. В., Корольченко А. Я., Рубцов В. В. К вопросу о категорировании помещений для хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей // Пожаровзрывобезопасность. — 2006. — Т. 15, № 1. — С. 25–29.
8. Комаров А. А., Бажина Е. В. Определение параметров динамических нагрузок от аварийных взрывов, действующих на здания и сооружения взрывоопасных производств // Вестник МГСУ. — 2013. — № 12. — С. 14–19.
9. Комаров А. А., Ляпин А. В. Методы повышения безопасности жилых и производственных помещений при аварийных взрывах бытового газа // Промышленное и гражданское строительство. — 2008. — № 3. — С. 51–52.
10. Мокшанцев А. В., Тетерин И. М., Топольский Н. Г. Модели, методы и алгоритмы поддержки принятия управленческих решений при поиске и обнаружении пострадавших под завалами, образующимися в результате чрезвычайных ситуаций, аварий, пожаров и взрывов // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. — 2013. — Т. 51, № 5. URL : <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-5/19-05-13.ttb.pdf> (дата обращения: 26.09.2014).
11. Симаков В. В., Тетерин И. М., Топольский Н. Г., Зеркаль А. Д., Мокшанцев А. В., Нгуен Тханг Куанг. О применении модуля ближней радиолокации в автоматизированных системах предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. — 2012. — Т. 42, № 2. URL : <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-2/11-02-12.ttb.pdf> (дата обращения: 10.02.2015).
12. Комаров А. А., Васюков Г. В., Загуменников Р. А., Бузаев Е. В. Взрыв газа на газонаполнительной станции в поселке Чагода. Причины и последствия // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 58–64.
13. Комаров А. А., Чиликина Г. В. Условия формирования взрывоопасных облаков в газифицированных жилых помещениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2002. — Т. 11, № 4. — С. 24–28.
14. Васюков Г. В., Корольченко А. Я., Рубцов В. В. Образование взрывоопасных объемов при аварийном поступлении пропан-бутановых смесей в помещение // Пожаровзрывобезопасность. — 2005. — Т. 14, № 6. — С. 39–42.
15. Путилов К. А. Курс физики. — М. : Физматгиз, 1963. — Т. 1. — 560 с.
16. Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы (введение в теорию) : учебное пособие. — М. : Наука, 1977. — 440 с.
17. Chuan-jie Zhu, Bai-quan Lin, Bing-you Jiang, Qian Liu, Yi-du Hong. Numerical simulation of blast wave oscillation effects on a premixed methane/air explosion in closed-end ducts // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2013. — Vol. 26, No. 4. — P. 851–861. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423013000399> (дата обращения: 28.09.2014).
18. Lei Pang, Tong Wang, Qi Zhang, Qiuju Ma, Lu Cheng. Nonlinear distribution characteristics of flame regions from methane–air explosions in coal tunnels // Process Safety and Environmental Protection. — 2014. — Vol. 92, No. 3. — P. 193–198. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582013000037> (дата обращения: 24.09.2014).

19. Valeria Di Sarli, Almerinda Di Benedetto, Gennaro Russo. Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles // Journal of Hazardous Materials. — 2009. — Vol. 169, No. 1–3. — P. 435–442. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409005172> (дата обращения: 24.09.2014).
20. СП 12.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты : приказ МЧС России от 25.03.2009 № 172; введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
21. Корольченко А. Я. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. — М. : Пожнаука, 2010. — 117 с.
22. Бузаев Е. В. Формирование взрывопожароопасных облаков тяжелых и легких углеводородных соединений на примере взрывной аварии // Сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. “Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации”. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. — С. 282–284.
23. Абросимов А. А. Экология переработки углеводородных систем. — М. : Химия, 2002. — 608 с.
24. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Пер. с англ. — М. : Мир, 1989. — 672 с.
25. Бесчастнов М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. — М. : Химия, 1991. — 432 с.
26. Пузач С. В., Лебедченко О. С., Воробьев Н. С. Модельная задача определения коэффициентов участия водорода в горении и взрыве // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 5. — С. 16–18.
27. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. — 336 с.

Материал поступил в редакцию 17 февраля 2015 г.

English

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION OF METHANE-AIR MIXTURE FORMATION PROCESS IN PREMISES

KOMAROV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of Hydraulics Department, Moscow State University of Civil
Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation;
e-mail address: bzbb@mail.ru)

VASYUKOV G. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Ecological Safety Department, State Fire Academy of Emercom
of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation;
e-mail address: gl-v@yandex.ru)

ZAGUMENNIKOV R. A., Postgraduate Student, State Fire Academy
of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366,
Russian Federation; e-mail address: r-unk@yandex.ru)

BUZAEV E. V., Postgraduate Student, Moscow State University
of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337,
Russian Federation; e-mail address: buzaevgen@mail.ru)

ABSTRACT

The most dangerous factor in the internal gas explosion is the overpressure, that can lead to the destruction of the building. Methane is the most widespread burnable gas in the oil and gas industry rooms. Usually, while performing explosion overpressure calculation, the most danger scenario is used when space is filled with stoichiometric concentration of air-gas mixture. In real accidents mixture may flame up at any moment that is why it will not be uniformly mixed. In this proceeding the process of explosive mixture formation at instantly ejection is considered. Methane concentrations at different levels have been experimentally estimated. The mathematical simulation by means of turbulent diffusion equation has been performed. The minimal turbulent diffusion coefficient has been determined as $5.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ at a vertical direction in immovable air at a temperature 25 °C. Obtained empirical value turbulent diffusion coefficient present a good agreement of

experimental and calculated data. The proposed method of distribution of methane in the premises enables numerical calculation of the methane amount turned into a dangerously explosive condition with time consideration, in the future determine value ΔP .

Keywords: gas leakage; explosive cloud; turbulent diffusion; methane-air mixture; overpressure.

REFERENCES

1. Mishuev A. V., Kazennov V. V., Khusnutdinov D. Z. Vzryvnaya opasnost dlya AES, zaproektirovannykh i postroennykh v Rossii bez ucheta vzryvnoy opasnosti [Explosion hazard of nuclear power plants that have been planned and built in Russia without meeting the explosion safety requirements]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 7, pp. 21–25.
2. Mishuev A. V., Kazennov V. V., Gromov N. V. Obespecheniye vzryvbezopasnosti i vzryvoustoychivosti promyshlennykh, transportnykh, energeticheskikh i grazhdanskikh ob'yektov [Software explosion and industrial blast transport energy and civilian objects]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, issue 1, vol. 2, pp. 336–340.
3. Mishuev A. V., Kazennov V. V., Gromov N. V., Lukyanov I. A., Prozorovskiy D. V., Bazhina E. V. Proektirovaniye ostekleniya zdaniy s uchetom trebovaniy po vzryvoustoychivosti i vzryvbezopasnosti [Design of glassing for buildings to meet the requires for resistance to explosion and explosion safety]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2010, issue 4, vol. 2, pp. 51–55.
4. Mishuev A. V., Kazennov V. V., Gusak L. N. Vzryvozashchita zdaniy [Explosion building protection]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2004, vol. 13, no. 6, pp. 24–25.
5. Brushlinskiy N. N., Korolchenko A. Ya. (eds.). *Modelirovaniye pozharov i vzryvov* [Modeling of fires and explosions]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000. 482 p.
6. Zagumennikov R. A. Nedostatki sovremennoy otsenki pozharovzryvopasnosti metana [The limitations of modern assessment of methane fire and explosion hazards]. *Sbornik statey po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem “Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy”* [Proceeding based on the All-Russian scientific-practical conference with international participation “Modern technologies of Civil Defence and Emergency Management”]. Voronezh, 2013, pp. 361–363.
7. Vasyukov G. V., Korolchenko A. Ya., Rubtsov V. V. K voprosu o kategorirovaniy pomescheniy dlya khraneniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya gazoballonnykh avtomobiley [On the problem of categorization of premises for storage and technical service of gas-balloon fire automobiles]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2006, vol. 15, no. 1, pp. 25–29.
8. Komarov A. A., Bazhina E. V. Opredeleniye parametrov dinamicheskikh nagruzok ot avariynykh vzryvov, deystvuyushchikh na zdaniya i sooruzheniya vzryvopasnykh proizvodstv [Determining the dynamic load caused by accidental explosions affecting buildings and structures of hazardous areas]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2013, no. 12, pp. 14–19.
9. Komarov A. A., Lyapin A. V. Metody povysheniya bezopasnosti zhilykh i proizvodstvennykh pomescheniy pri avariynykh vzryvakh bytovogo gaza [Methods of improvement of residential and industrial buildings safety in case of emergency explosions of domestic gas]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo — Industrial and Civil Engineering*, 2008, no. 3, pp. 51–52.
10. Mokshantsev A. V., Teterin I. M., Topolskiy N. G. Modeli, metody i algoritmy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri poiske i obnaruzhenii postradavshikh pod zavalami, obrazuyushchimisya v rezultate chrezvychaynykh situatsiy, avari, pozharov i vzryvov [Models, methods and algorithms of support of decision-making in the search and find survivors under the rubble, formed in the result of emergency situations, accidents, fires and explosions]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal — Technologies of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2013. vol. 51, no. 5. Available at: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-5/19-05-13.ttb.pdf> (Accessed 26 September 2014).
11. Simakov V. V., Teterin I. M., Topolskiy N. G., Zerkal A. D., Mokshantsev A. V., Nguyen Thang Quang. O primeneni module blizhney radiolokatsii v avtomatizirovannykh sistemakh preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy [About use of the module of the near radar-location in the automated systems of the prevention and elimination of emergency situations]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal — Technologies of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2012. vol. 42, no. 2. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-2/11-02-12.ttb.pdf> (Accessed 10 February 2015).

12. Komarov A. A., Vasyukov G. V., Zagumennikov R. A., Buzaev E. V. Vzryv gaza na gazonapolnitelnoy stantsii v poselke Chagoda. Prichiny i posledstviya [Gas explosion at the gas-filling station in the settlement of Chagoda. Causes and consequences]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 58–64.
13. Komarov A. A., Chilikina G. V. Usloviya formirovaniya vzryvoopasnykh oblakov v gazifitsirovannykh zhilykh pomeshcheniyakh [Conditions of explosive mixture formation in residential houses with gas heating systems]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 4, pp. 24–28.
14. Vasyukov G. V., Korolchenko A. Ya., Rubtsov V. V. Obrazovaniye vzryvoopasnykh ob'yemov pri avariynom postuplenii propan-butanovykh smesey v pomeshcheniye [Formation of high explosive volumes during emergency entry of propane-butane mixtures into the premises]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2005, vol. 14, no. 6, pp. 39–42.
15. Putilov K. A. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, vol. 1. 560 p.
16. Godunov S. K., Ryabenkiy V. S. Raznostnyye skhemy (vvedeniye v teoriyu) [Difference schemes (introduction to the theory)]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 440 p.
17. Chuan-jie Zhu, Bai-quan Lin, Bing-you Jiang, Qian Liu, Yi-du Hong. Numerical simulation of blast wave oscillation effects on a premixed methane/air explosion in closed-end ducts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, July 2013, vol. 26, issue 4, pp. 851–861. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423013000399> (Accessed 28 September 2014).
18. Lei Pang, Tong Wang, Qi Zhang, Qiuju Ma, Lu Cheng. Nonlinear distribution characteristics of flame regions from methane–air explosions in coal tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, vol. 92, issue 3, pp. 193–198. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582013000037> (Accessed 24 September 2014).
19. Valeria Di Sarli, Almerinda Di Benedetto, Gennaro Russo. Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles. *Journal of Hazardous Materials*, 30 September 2009, vol. 169, issues 1–3, pp. 435–442. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409005172> (Accessed 24 September 2014).
20. *Set of rules 12.13130.2009. Definition of categories premises, buildings and outdoor facilities for explosion and fire hazard*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009. 32 p. (in Russian).
21. Korolchenko A. Ya. *Kategorirovaniye pomeshcheniy i zdaniy po vzryvopozharnoy i pozharnoy opasnosti* [Categorization of rooms and buildings on fire and explosion hazard]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010. 117 p.
22. Buzaev E. V. Formirovaniye vzryvopozharoopasnykh oblakov tyazhelykh i legkikh uglevodorodnykh soyedineniy na primere vzryvnoy avarii [Formation of explosive clouds of heavy and light hydrocarbon compounds on the example of an explosive accident]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Pozharotusheniye: problemy, tekhnologii, innovatsii”* [Proceeding of the International scientific-practical conference “Firefighting: problems, technology, innovation”]. Moscow, 2012, pp. 282–284.
23. Abrosimov A. A. *Ekologiya pererabotki uglevodorodnykh sistem* [Ecology recycling of hydrocarbon systems]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 608 p.
24. Marshall V. C. *Major chemical hazards*. Chichester, Ellis Horwood Ltd., 1987 (Russ. ed.: *Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv*. Moscow, Mir Publ., 1989. 672 p.).
25. Beschastnov M. V. *Promyshlennyye vzryvy. Otsenka i preduprezhdeniye* [Industrial explosions. Assessment and prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 432 p.
26. Puzach S. V., Lebedchenko O. S., Vorobyev N. S. Modelnaya zadacha opredeleniya koeffitsientov uchastiya vodoroda v gorenii i vzryve [A model problem of determining participation rates of hydrogen combustion and explosion]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 16–18.
27. Puzach S. V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods for calculating the heat and mass transfer in a fire in the room and their application in solving practical problems fire and explosion safety]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005. 336 p.