УДК 614.835.4

А.А. Комаров, Е.В. Бузаев, Г.В. Васюков*, Р.А. Загуменников*

*ФГБОУ ВПО «МГСУ», *ФГБОУ ВПО «АГПС МЧС России»*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПОМЕЩЕНИИ

Представлены экспериментальные исследования распространения чернил в воде и взрывное горение метановоздушной смеси. Описаны процессы формирования взрывоопасной смеси в помещении при утечке метана, представлена визуализация процесса формирования взрывоопасной смеси. Математическая модель и расчетная схема адекватно описывают ход и подтверждают результаты проведенных экспериментов. Косвенно определен коэффициент турбулентной диффузии при заданных условиях.

Ключевые слова: формирование взрывоопасной смеси, коэффициент турбулентной диффузии, аварийная утечка, метан, газодинамические процессы.

При аварийных утечках горючих веществ от бытовых газовых плит в жилом секторе и оборудования на производственных объектах формируется взрывопожароопасная смесь. Последствиями таких аварий являются человеческие жертвы и материальный ущерб. Для прогнозирования аварийных ситуаций и сведения к минимуму последствий необходимо исследовать физику явления данного процесса. Также возникает необходимость обеспечения взрывоустойчивости при проектировании промышленных сооружений нефтегазовой отрасли и энергоемких объектов. Как показал анализ [1—9], на формирование газоздушных смесей горючих веществ влияют: коэффициент турбулентной диффузии; параметры источников аварийных выбросов (характерная площадь утечки, расход, давление, количество, место расположения); физические свойства газоздушных смесей; условия окружающей среды (наличие подвижности воздуха, месторасположение ограждающих конструкций и пр.). Основной задачей данного исследования является определение и описание процесса формирования взрывоопасных зон при аварийных выбросах горючих веществ внутри помещений.

Экспериментальные исследования. Взрывоопасные вещества не видны человеческому глазу, поэтому для визуализации физического процесса воспользуемся моделью распространения и растворения чернил в воде. На основании анализа работ [10—13] можно сделать выводы — законы распространения жидкостей и газов схожи. Будем рассматривать один из двух одновременных процессов распространения одного вещества в другом — газодинамические потоки.

Были проведены экспериментальные исследования в объеме — в параллелепипеде из стекла с характерными размерами $465 \times 220 \times 330$ мм. Объем полностью заполнен водой. Температура воды — 15°C . В центре модели на поверхность жидкости через пипетку подавались капли чернил (эксперимент № 1). Задержка расхода капель — 0,5 с. В ходе эксперимента проводилась видеозапись. Схема экспериментальной модели приведена на рис. 1.

В эксперименте № 1 через пипетку подавались чернила общим количеством $V = 0,1$ мл (20 капель). Место подачи капель чернил — т. 1 (см. рис. 1). Через 15 с после начала подачи чернила достигли дна модели. Температура воздуха $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 2 приведены кадры видеозаписи эксперимента № 1.

Рис. 1. Схема экспериментальной модели

Рис. 2. Кадры видеозаписи эксперимента № 1 — распространение чернил в модели через: а — 5 с; б — 15 с; в — 25 с; г — 35 с

В эксперименте № 1 преобладают гидродинамические потоки. Чернила ввиду большей плотности, чем у воды, падают на дно модели. Далее начинают активно распространяться по нижней грани (дну) модели. И лишь после начинают активно диффундировать. Данная модель визуализации процесса характерна для распространения взрывоопасных смесей.

Для подтверждения результатов эксперимента № 1 были проведены экспериментальные исследования взрывного горения на модели кубического объема с ребром 1 м [14], также были проанализированы [15—17]. На одной грани модели имелся сбросной проем размером 100×700 мм (дверца, открывающаяся на навесных петлях). В центре нижней грани через отверстие диаметром 4 мм подавался метан (эксперименты № 3 и 4). В модели находился непрерывно действующий источник зажигания (в т. 1 и 2 рис. 3). В процессе истечения

метана из отверстия сбросной проем закрыт. В ходе эксперимента проводилась видеозапись грани со сбросным отверстием. Схема взрывной камеры приведена на рис. 3.

В эксперименте № 2 через отверстие диаметром 4 мм подавали метан. Расход подачи был задан и составил $q = 0,274$ л/с. Воспламенение, а как следствие, взрывное горение метановоздушной смеси произошло в т. 1 через 151 с. Количество поступившего газа во взрывную камеру составило 44 л. На рис. 5 приведены кадры из видеозаписи эксперимента № 2.

Рис. 3. Схема взрывной камеры

Рис. 4. Кадры видеозаписи эксперимента № 2 через: а — 0,083 с; б — 0,25 с; в — 0,333 с; г — 0,5 с

В эксперименте № 3, аналогично эксперименту № 2, подавали метан. Было изменено положение источника воспламенения, но расход подачи газа остался прежним (т. 2 рис. 1). Воспламенение, а как следствие, взрывное горение метановоздушной смеси произошло через 201 с. Количество поступившего газа во взрывную камеру составило 52 л. На рис. 5 приведены кадры видеозаписи эксперимента № 3.

Рис. 5. Кадры видеозаписи эксперимента № 3 через: а — 0,083 с; б — 0,25 с; в — 0,333 с; г — 0,5 с

Математическое моделирование экспериментов. Процесс формирования аварийной утечки метана был смоделирован с помощью анализа [18—22] и численного интегрирования уравнения диффузии (2-й закон Фика) [23]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial Q}{\partial V}, \quad (1)$$

где $C(x, y, z, t)$ — объемная концентрация вещества в смеси; D_x, D_y, D_z — коэффициенты турбулентной диффузии для различных направлений; Q — объемный расход вещества; t — время; x, y, z — координаты; V — объем.

Для расчета использовалась трехмерная математическая модель. Расчетная область $100 \times 99 \times 98$ была принята из расчетных ячеек с размером $x_0 = 0,01 \text{ м} = 1 \text{ см}$.

На стенках взрывной камеры принималось условие непротекания жидкости $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$, где n — нормаль к поверхности [14].

Описание и результаты анализа свойств метана описаны в [24]. Он относится к легким газам (газ с плотностью меньшей, чем плотность воздуха, т.е. при формировании взрывопожароопасных облаков в атмосфере он стремится переместиться в верхние слои) $D_x = D_y < D_z$ [25].

В результате экспериментов № 2 и 3 получили следующие значения коэффициентов диффузии: $D_z = 4,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_x = D_y = 3,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. При данных коэффициентах турбулентной диффузии через 151 с (201 с) после начала по-

дачи газа в т. 1 (2) наблюдается концентрация, близкая к нижнему концентрационному пределу воспламенения, т.е. в этот момент смесь должна воспламениться, что наблюдалось в экспериментах № 2 и 3 [14]. На рис. 6 показаны линии равной концентрации метановоздушной смеси (в сечении $y = \text{const} = 500$ мм — 50 ячейка по оси y (см. рис. 1)) в момент начала взрывного горения для вышеописанных экспериментов.

Рис. 6. Линии равной концентрации метановоздушной смеси через: а — 151 с; б — 201 с

Выводы. 1. Для определения и описания процесса формирования взрывоопасной смеси в помещении при утечке метана проведены экспериментальные исследования распространения чернил в воде и взрывного горения метановоздушной смеси.

2. Используемая математическая модель и расчетная схема адекватно описывают ход проведенных экспериментов.

3. Данный метод экспериментального измерения и последующего расчета процессов формирования взрывоопасных зон при аварийных выбросах горючих веществ позволяет косвенно определять коэффициент турбулентной диффузии при заданных условиях.

4. Коэффициент турбулентной диффузии является основным параметром, с помощью которого возможно достаточно точно спрогнозировать процесс развития аварийной ситуации, связанной с утечками горючих газов.

Библиографический список

1. Комаров А.А., Чиликина Г.В. Условия формирования взрывоопасных облаков в газифицированных жилых помещениях // Пожаровзрывобезопасность. 2002. Т. 11. № 4. С. 24—28.
2. Clavin P., Williams F.A. Analytical studies of the dynamics of gaseous detonations // Phil. Trans. R. Soc. A. 2012. Vol. 370. No. 2. Pp. 597—624.
3. Coelho P.J. A theoretical analysis of the influence of turbulence on radiative emission in turbulent diffusion flames of methane // Combustion and Flame. 2013. Vol. 160. No. 3. pp. 610—617.
4. Xiaoping Wen, Minggao Yu, Zhichao Liu, Wence Sun. Large eddy simulation of methane-air deflagration in an obstructed chamber using different combustion models // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2012. Vol. 25. No. 4. Pp. 730—738.

5. Sochet I., Gillard P., Guélon F. Effect of the concentration distribution on the gaseous deflagration propagation in the case of H_2/O_2 mixture // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2006. Vol. 19. No. 2—3. Pp. 250—262.
6. DeHaan J.D., Crowhurst D., Hoare D., Bensilum M., Shipp` M.P. Deflagrations involving stratified heavier-than-air vapor/air mixtures // Fire Safety Journal. 2001. Vol. 36. No. 7. Pp. 693—710.
7. Адушкин В.В., Козарко С.М., Лямин А.Г. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере // Взрывное дело : сб. № 75/32. Свойства взрывчатых материалов и их совершенствование. М. : Недра, 1975. С. 82—94.
8. Мишуев А.В., Казеннов В.В., Комаров А.А., Громов Н.В., Лукьянов А.В., Прозоровский Д.В. Особенности аварийных взрывов внутри жилых газифицированных зданий и промышленных объектов // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 3. С. 49—56.
9. Горев В.А., Медведев Г.М. Влияние формы облака и места инициирования взрыва на характер взрывной волны // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 6. С. 29—33.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 5-е изд., перераб. М. : Наука, 1978. 736 с.
11. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика в 2-х ч. 6-е изд. М. : Физматлит, 1963. Ч. 1. 584 с.; Ч. 2. 728 с.
12. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. 2-е изд. М. : Наука, 1977. 407 с.
13. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960. 715 с.
14. Комаров А.А., Бузаев Е.В. Экспериментальное определение коэффициента турбулентной диффузии для расчета процессов формирования взрывоопасных облаков // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. 17 Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. М. : МГСУ, 2014. С. 504—509.
15. Поландов Ю.Х., Бабанков В.А. Влияние места расположения источника воспламенения в помещении на развитие взрыва газа // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 3. С. 68—74.
16. Абдурагимов И.М. Эффект «убегания» паровоздушной горючей смеси от фронта пламени при «взрыве» ее в замкнутом объеме // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 2. С. 13—27.
17. Горев В.А. Оценка скорости горения однородной газовой смеси при определяющем влиянии неустойчивости пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 1. С. 12—16.
18. Mingshu Bi, Chengjie Dong, Yihui Zhou. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large L/D closed pipes // Applied Thermal Engineering. July 2012. Vol. 40. Pp. 337—342.
19. Аалыкин Г.Б., Годунов С.К., Киреева И.Л., Плинер Л.А. Решение одномерных задач газовой динамики в подвижных сетках. М. : Наука, 1970. 112 с.
20. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 480 с.
21. Коробейников В.П. Задачи теории точечного взрыва в газах. М. : Наука, 1973. 400 с.
22. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М. : Высш. шк., 1970. 710 с.
23. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М. : Гос. изд.-во технико-теоретической лит-ры, 1953. 788 с.
24. Загуменников Р.А. Недостатки современной оценки пожаровзрывоопасности метана // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по материалам всеросс. науч.-практ. конф. Воронеж, 2013. С. 361—363.

25. Бузаев Е.В. Формирование взрывопожароопасных облаков тяжелых и легких углеводородных соединений на примере взрывной аварии // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. М. : АГПС МЧС России, 2012. С. 282.

Поступила в редакцию в октябре 2014 г.

Об авторах: **Комаров Александр Андреевич** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, bzbb@mail.ru;

Бузаев Евгений Владимирович — аспирант кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, buzaevgen@mail.ru;

Васюков Глеб Викторович — кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры экологической безопасности, **Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (ФГБОУ ВПО «АГПС МЧС России»)**, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, gl-v@yandex.ru;

Загуменников Руслан Андреевич — адъюнкт кафедры процессов горения, **Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (ФГБОУ ВПО «АГПС МЧС России»)**, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, r-unk@yandex.ru.

Для цитирования: *Комаров А.А., Бузаев Е.В., Васюков Г.В., Загуменников Р.А. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 132—140.*

A.A. Komarov, E.V. Buzyaev, G.V. Vasyukov, R.A. Zagumennikov

SIMULATION OF ACCIDENTAL EMISSIONS OF EXPLOSIVE SUBSTANCES IN PREMISES

The article presents and analyzes experimental studies of the distribution of ink in the water and the explosive combustion of methane-air mixture. The authors described the processes of explosive mixtures' formation in a room in case of methane leakage. The article also presents the visualization of the formation process of explosive mixtures. The mathematical model and calculation model adequately describe the process and confirm the results of the experiments. The coefficient of turbulent diffusion under the given conditions is indirectly determined.

Explosive mixtures usually form accidental leaks of combustible substances from household stoves in the residential sector. The consequences of such accidents are human losses and material damage. As the analyses have shown the formation of gas-air mixtures of combustible substances is affected by: turbulent diffusion coefficient, the parameters of the sources of accidental releases, the physical properties of gas-air mixtures and other.

Explosive substances are not visible to the human eye. In order to visualize the physical process we will use the model distribution and dissolution of ink in water. Based on the analysis of the works of different scientists it was concluded that the laws of distribution of liquids and gases are similar.

The experiments were carried out in order to study the distribution of ink in the water and explosive combustion of methane-air mixture to determine and describe the process of formation of explosive mixtures in a room in case of methane leakage. The coefficient of turbulent diffusion is a key parameter that can accurately predict the development of these emergency situations.

Key words: formation of explosive mixtures, turbulent diffusion coefficient, emergency leak, methane, gas-dynamic processes.

References

1. Komarov A.A., Chilikina G.V. Usloviya formirovaniya vzryvoopasnykh oblakov v gazifitsirovannykh zhilykh pomeshcheniyakh [Formation Conditions of Explosive Clouds in Gasified Living Spaces]. *Pozharovzryvobezопасnost'* [Fire Safety]. 2002, vol. 11, no. 4, pp. 24—28. (in Russian)
2. Clavin P., Williams F.A. Analytical Studies of the Dynamics of Gaseous Detonations. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2012, vol. 370, no. 2, pp. 597—624. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0345>.
3. Coelho P.J. A Theoretical Analysis of the Influence of Turbulence on Radiative Emission in Turbulent Diffusion Flames of Methane. *Combustion and Flame*. 2013, vol. 160, no. 3, pp. 610—617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.11.009>.
4. Xiaoping Wen, Minggao Yu, Zhichao Liu, Wence Sun. Large Eddy Simulation of Methane-air Deflagration in an Obstructed Chamber Using Different Combustion Models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2012, vol. 25, no. 4, pp. 730—738. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2012.04.008>.
5. Sochet I., Gillard P., Guélon F. Effect of the Concentration Distribution on the Gaseous Deflagration Propagation in the Case of H_2/O_2 Mixture. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006, vol. 19, no. 2—3, pp. 250—262. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2005.02.006>.
6. DeHaan J.D., Crowhurst D., Hoare D., Bensilum M., Shipp` M.P. Deflagrations Involving Stratified Heavier-Than-Air Vapor/Air Mixtures. *Fire Safety Journal*. 2001, vol. 36, no. 7, pp. 693—710. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112\(01\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00011-X).
7. Adushkin V.V., Kogarko S.M., Lyamin A.G. Raschet bezopasnykh rasstoyaniy pri gazovom vzryve v atmosfere [Calculation of Safe Distances in Case of Gas Explosion in the Atmosphere]. *Vzryvnoe delo: sbornik* [Explosion Issue: Collection]. Moscow, Nedra Publ., 1975, no. 75/32, Svoystva vzryvchatykh materialov i ikh sovershenstvovanie [Features of Explosive Materials and their Improvement], pp. 82—94. (in Russian)
8. Mishuev A.V., Kazennov V.V., Komarov A.A., Gromov N.V., Luk'yanov A.V., Prozorovskiy D.V. Osobennosti avariynykh vzryvov vnutyri zhilykh gazifitsirovannykh zdaniy i promyshlennykh ob"ektov [Features of Crash Explosions in Living Gasified Buildings and Industrial Objects]. *Pozharovzryvobezопасnost'* [Fire Safety]. 2012, vol. 21, no. 3, pp. 49—56. (in Russian)
9. Gorev V.A., Medvedev G.M. Vliyaniye formy oblaka i mesta initsirovaniya vzryva na kharakter vzryvnoy volny [Influence of the Cloud Shape and the Place of Explosion Initiation on the Explosion Blast Nature]. *Pozharovzryvobezопасnost'* [Fire Safety]. 2012, vol. 21, no. 6, pp. 29—33. (in Russian)
10. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Liquid and Gas Mechanics]. 5 edition. Moscow, Nauka Publ., 1978, 736 p. (in Russian)
11. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidromekhanika v 2-kh chastyakh* [Theoretical Hydromechanics in 2 Volumes]. 6th edition. Moscow, Fizmatlit Publ., 1963, vol. 1, 584 p., vol. 2, 728 p. (in Russian)
12. Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. *Problemy gidrodinamiki i ikh matematicheskie modeli* [Hydrodynamics Problems and their Mathematical Models]. 2nd edition. Moscow, Nauka Publ., 1977, 407 p. (in Russian)
13. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of Turbulent Jets]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960, 715 p. (in Russian)
14. Komarov A.A., Buzaev E.V. Eksperimental'noe opredeleniye koeffitsienta turbulentnoy diffuzii dlya rascheta protsessov formirovaniya vzryvoopasnykh oblakov [Experimental Calculation of Turbulent Diffusion Coefficient for Estimation of Explosive Clouds Formation Processes]. *Stroitel'stvo — formirovaniye sredy zhiznedeyatel'nosti : sbornik trudov 17 Mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Construction — Formation of Living Environment : Collection of the Works of 17th International Interuniversity Science and Practice Conference]. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 504—509. (in Russian)
15. Polandov Yu.Kn., Babankov V.A. Vliyaniye mesta raspolozheniya istochnika vosplamneniya v pomeshchenii na razvitiye vzryva gaza [Influence of Ignition Source Location in a Premise on Gas Explosion Development]. *Pozharovzryvobezопасnost'* [Fire Safety]. 2014, vol. 23, no. 3, pp. 68—74. (in Russian)

16. Abduragimov I.M. Effekt ubeganiya parovozdushnoy goryuchey smesi ot fronta plameni pri «vzryve» ee v zamknutom ob"eme [“Flow” Effect of Combustible Vapour-air Mixture from Flame Front in Case of its “Explosion” in an Enclosed Volume]. *Pozharovzryvbezopasnost'* [Fire Safety]. 2012, vol. 21, no. 2, pp. 13—27. (in Russian)
17. Gorev V.A. Otsenka skorosti goreniya odnorodnoy gazovoy smesi pri opredelyayushchem vliyaniy neustoychivosti plameni [Estimation of Uniform Gas Mixture Combustion Speed in Case of Determining Influence of Flame Instability]. *Pozharovzryvbezopasnost'* [Fire Safety]. 2008, vol. 17, no. 1, pp. 12—16. (in Russian)
18. Mingshu Bi, Chengjie Dong, Yihui Zhou. Numerical Simulation of Premixed Methane-Air Deflagration in Large L/D Closed Pipes. *Applied Thermal Engineering*. July 2012, vol. 40, pp. 337—342. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065>.
19. Alalykin G.B., Godunov S.K., Kireeva I.L., Pliner L.A. Reshenie odnomernykh zadach gazovoy dinamiki v podvizhnykh setkakh [Solving One-dimension Problems of Gas Dynamics in Moving Grids. Moscow, Nauka Publ., 1970, 112 p. (in Russian)
20. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical Theory of Combustion and Explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 480 p. (in Russian)
21. Korobeynikov V.P. *Zadachi teorii tochechnogo vzryva v gazakh* [Problems of Point Explosion Theory in Gases]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 400 p. (in Russian)
22. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Urvneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Control Circuit in Partial Derivatives in Mathematical Physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 710 p. (in Russian)
23. Landau L.D., Lifshits E.M. *Mekhanika sploshnykh sred* [Continuous Media Mechanics]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1953, 788 p. (in Russian)
24. Zagumennikov R.A. Nedostatki sovremennoy otsenki pozharovzryvopasnosti metana [Drawbacks of Contemporary Estimation of Methane Fire and Explosion Hazard]. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy : sbornik statey po materialam vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 19 aprelya* [Modern Technologies in Providing Civil Defense and Emergency Recovery : Collection of Articles from the Materials of All-Russian Science and Practice Conference, April, 19th]. Voronezh, 2013, pp. 361—363. (in Russian)
25. Buzaev E.V. Formirovaniye vzryvopozharopasnykh oblakov tyazhelykh i legkikh uglevodorodnykh soedineniy na primere vzryvnoy avarii [Formation of Explosive Clouds of Heavy and Light-hydrocarbon Compounds on Exaple of Explosion Accidents]. *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fire Supression: Problems, Technologies, Innovations : Materials of International Science and Practice Conference]. Moscow, AGPS MChS Rossii Publ., 2012, p. 282. (in Russian)

About the authors: **Komarov Aleksandr Andreevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; bzbb@mail.ru;

Buzaev Evgeniy Vladimirovich — postgraduate student, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; buzaevgen@mail.ru;

Vasyukov Gleb Viktorovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair, Department of Environmental Safety, **State Fire Academy of EMERCOM of Russia (AGPS)**, 4 Borisa Galushkina street, Moscow, 129366, Russian Federation; gl-v@yandex.ru;

Zagumennikov Ruslan Andreevich — postgraduate student, Department of Combustion Processes, **State Fire Academy of EMERCOM of Russia (AGPS)**, 4 Borisa Galushkina street, Moscow, 129366, Russian Federation; r-unk@yandex.ru.

For citation: Komarov A.A., Buzaev E.V., Vasyukov G.V., Zagumennikov R.A. Modelirovaniye avariynykh vybrosov vzryvopasnykh veshchestv v pomeshchenii [Simulation of Accidental Emissions of Explosive Substances in Premises]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 10, pp. 132—140. (in Russian)