

УДК 622.81

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

**НОВОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА
ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ****С.Г. Алексеев^{1, 2}, А.С. Авдеев^{1, 3}, Н.М. Барбин^{2, 4}**¹Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения Российской академии наук (620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а)²Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России (620062, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22)³Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Пермскому краю (614990, Россия, г. Пермь, ул. Екатеринбургская, 53а)⁴Уральский государственный аграрный университет (620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42)**NEW EQUATION FOR DETERMINATION OF OVERPRESSURE OF FUEL-AIR MIXTURE BLAST****Sergey G. Alexseev^{1, 2}, Aleksandr S. Avdeev^{1, 3}, Nikolay M. Barbin^{2, 4}**¹Scientific and Engineering Center “Reliability and Resource of Large Systems and Machines” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Studencheskaya st., Building A, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation)²Ural Institute of State Firefighting Service of EMERCOM of Russia (22 Mira st., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation)³Forensic Expert Institution of the Federal Firefighting Service “Test Fire Laboratory” in Perm Region (53 Ekaterininskaya st., Building A, Perm, 614990, Russian Federation)⁴Ural State Agrarian University (42 Karla Libknekhta st., Yekaterinburg, 620075, Russian Federation)

Получена / Received: 29.05.2017. Принята / Accepted: 18.07.2017. Опубликовано / Published: 15.09.2017

Ключевые слова:

TNO, Дорофеев, Ростехнадзор, Госатомнадзор, МЧС России, BS, BST, избыточное давление взрыва, приведенное расстояние, параметр Сахса, детонация, дефлаграция, взрыв топливовоздушной смеси, мультиэнергетический метод TNO, прогнозирование.

Проблемы оценки последствий взрывов топливовоздушных смесей и их предупреждения являются злободневными и имеют практический интерес. Эти взрывы представляют реальную опасность при переработке, транспортировке и хранении топлив на различных промышленных и гражданских объектах. Прогнозирование возможных последствий взрывов топливовоздушных смесей является основным элементом в разработке защитных мероприятий. В настоящее время различными ведомствами и организациями разработаны и утверждены разные расчётные методики. Ранее авторами была проведена верификация методов Госатомнадзора (РБ Г-05-039-96), Ростехнадзора (РД 03-409-01, ПБ 09-540-03, Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей, Общие правила взрывобезопасности для взрывоопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств), МЧС России (ГОСТ Р 12.3.047-98, ГОСТ Р 12.3.047-2012, СП 12.13130.2009), Нидерландской организации прикладных научных исследований (TNT, ME-TNO), Дорофеева, Бейкера–Стрелюу и Бейкера–Стрелюу–Танга для прогнозирования последствий взрывов топливовоздушных смесей на примере реальных взрывов. Установлено, что режим детонации лучше всего описывает метод Дорофеева, а режим дефлаграции мультиэнергетический метод Нидерландской организации прикладных научных исследований (ME-TNO). Таким образом, создание синтез-метода, в котором сочетались бы подходы этих методик, является перспективным направлением. Из метода ME-TNO был вычленен режим детонации и заменен методикой Дорофеева. Данный прием позволил предложить новое уравнение для прогнозирования давления взрыва топливовоздушных смесей, которое

описывается следующей формулой:
$$\Delta P = P_0 \left(a + \frac{b}{R_x} + \frac{c}{(R_x)^2} + \frac{d}{(R_x)^3} + \frac{e}{(R_x)^4} + \frac{f}{(R_x)^5} + \frac{g}{(R_x)^6} + \frac{h}{(R_x)^7} \right)$$
, где P_0 –

атмосферное давление; R_x – приведенное расстояние (параметр Сахса); a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические константы, зависящие от класса взрывного превращения. В результате проведенного исследования предложено новое уравнение для расчета избыточного давления взрыва, которое более точно прогнозирует последствия взрывов топливовоздушных смесей на объектах нефтегазовой, нефтехимической и химической отраслей промышленности.

Key words:

TNO, Dorofeev, Rostechnadzor, Gosatomnadzor, EMERCOM of Russia, BS, BST, blast overpressure, reduced distance, Sachs's parameter, detonation, deflagration, explosion of fuel-air mixture, multi-energy method TNO, forecasting.

The problems of assessing the consequences of fuel-air mixtures and their prevention are topical and of practical interest. Such the explosions pose a real danger during processing, transportation and storage of fuels at various industrial and civil facilities. Forecast of possible consequences of explosions of fuel-air mixtures is a key element in development of protective measures. Today, various calculation methods have been developed and approved by different departments and organizations. The authors of the article have previously verified methods of Gosatomnadzor (RB G-05-039-96), Rostechnadzor (RD 03-409-01, PB 09-540-03, Method for assessment of consequences of accidental explosions of fuel-air mixtures, General explosion safety rules for explosive chemicals, petrochemicals and refineries), EMERCOM of Russia (GOST R 12.3.047-98, GOST R 12.3.047-2012, SP 12.13130.2009), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Dorofeev, Baker-Strehlow and Baker-Strehlow-Tang for prediction of consequences of air-fuel mixture explosions at the example of real explosions. It is established that the detonation regime is best described by the Dorofeev's method and multi-energy method of Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (ME-TNO) for deflagration regime. Thus, it is promising to create a synthesis method that could combine approaches of the methods. Detonation mode was picked out using the ME-TNO method and replaced by Dorofeev's method. Such a technique allowed proposing a new equation for predicting

explosion pressure of fuel-air mixtures:
$$\Delta P = P_0 \left(a + \frac{b}{R_x} + \frac{c}{(R_x)^2} + \frac{d}{(R_x)^3} + \frac{e}{(R_x)^4} + \frac{f}{(R_x)^5} + \frac{g}{(R_x)^6} + \frac{h}{(R_x)^7} \right)$$
, where P_0 is

atmosphere pressure, R_x is reduced distance (Sachs's parameter), $a-h$ are empirical constants that depend on the class of blast transformation. As a result of the research, a new equation is proposed. An equation allows calculating the overpressure of explosion, which more accurately predicts the consequences of fuel-air explosions at petroleum and gas, petrochemical and chemical industries.

Алексеев Сергей Геннадьевич – кандидат химических наук, доцент, член-корреспондент Всемирной академии наук комплексной безопасности, старший научный сотрудник (моб. тел.: +007 922 602 13 35, e-mail: 3608113@mail.ru).

Авдеев Александр Станиславович – начальник сектора (тел.: +007 342 212 63 70, e-mail: 3608113@mail.ru).

Барбин Николай Михайлович – доктор технических наук, доцент, почетный работник науки и техники Российской Федерации, старший научный сотрудник (моб. тел.: +007 922 222 78 11, e-mail: NMBarbin@mail.ru).

Sergey G. Alexseev (Author ID in Scopus: 56956922400, 55900654900, 36054526600, 16456605500, 6601981415) – PhD in Chemistry, Associate Professor, Corresponding Member of the Worldwide Academy of Sciences for Complex Security, Senior Research Fellow (mob. tel.: +007 922 602 13 35, e-mail: 3608113@mail.ru).

Aleksandr S. Avdeev – Head of the Sector (tel.: +007 342 212 63 70, e-mail: 3608113@mail.ru).

Nikolay M. Barbin (Author ID in Scopus: 6701448034) – Doctor of Engineering, Associate Professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Senior Research Fellow (mob. tel.: +007 922 222 78 11, e-mail: NMBarbin@mail.ru).

Введение

Проблемы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей (далее ТВС) и предупреждения взрывов ТВС являются злободневными и имеют практический интерес, так как они представляют реальную опасность при переработке, транспортировке (перекачке) и хранении топлив на различных промышленных и гражданских объектах. Прогнозирование возможных последствий взрывов ТВС является основным элементом в разработке защитных мероприятий [1–10]. В настоящее время различными ведомствами и организациями разработаны и утверждены разные расчётные методики. Ранее нами проведены работы по изучению возможностей отечественных и зарубежных методик по прогнозированию последствий взрывов ТВС. На примерах решения однотипных расчетных задач показана плохая совместимость методов Госатомнадзора, Ростехнадзора, МЧС России, Нидерландской организации прикладных научных исследований (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, сокращенно TNO), Дорофеева, Бейкера–Стрелу (BS) и Бейкера–Стрелу–Танга (BST) [11–23]. При анализе последствий реальных взрывов ТВС установлено, что режим детонации лучше всего описывает метод Дорофеева, а режим дефлаграции – мульти-энергетический метод TNO (ME-TNO). При известной скорости распространения пламени методика Ростехнадзора дает удовлетворительные результаты [21–23]. Таким образом, создание синтез-метода, в котором сочетались бы подходы методик Дорофеева и ME-TNO, является перспективным направлением.

Основные положения методов Дорофеева и ME-TNO

Метод Дорофеева [21–23] можно рассматривать как дальнейшее развитие подхода методики Ростехнадзора, поскольку С.Б. Дорофеев является одним из разработчиков РД 03-409-01¹ [24]. Основное отличие этих методов заключается в способе

определения параметров взрыва ТВС в режиме детонации. В РД 03-409-01 [27] и РБ «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [28] используются уравнения (1)–(4), а в методе Дорофеева – формулы (3)–(6).

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2, \quad (1)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,0096(\ln(R_x))^2, \quad (2)$$

$$\Delta P = P_x P_0, \quad (3)$$

$$I = \frac{I_x \sqrt[3]{P_0^2 E}}{C_0}, \quad (4)$$

а в методе Дорофеева – формулы (3); (4) и

$$P_x = \frac{0,34}{(R_x)^{4/3}} + \frac{0,062}{(R_x)^2} + \frac{0,0033}{(R_x)^3}, \quad (5)$$

$$I_x = \frac{0,0353}{(R_x)^{0,968}}, \quad (6)$$

где P_x , I_x – приведенные давление взрыва и импульс положительной фазы сжатия воздушной ударной волны (ВУВ); R_x – приведенное расстояние или параметр Sacha ($Sach$), $R_x = \frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{1/3}}$; R – расстояние от центра

взрыва, м; E – энергия взрыва, Дж; P_0 – нормальное давление, кПа; C_0 – скорость звука в воздухе, м/с.

В ME-TNO – методе для описания взрывов ТВС – используются формулы (3), (7), (8)

$$t_p = t_p' \frac{\sqrt[3]{E/P_0}}{C_0}, \quad (7)$$

$$I = \frac{P_x t_p}{2}, \quad (8)$$

где t_p – время сжатия ВУВ, с.

Применяются также специальные номограммы, описывающие зависимость приведенных давления взрыва (P_x) и времени

¹ В настоящее время РД 03-409-01 отменены и заменены на РБ «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливовоздушных смесей» [28], но метод расчета избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия в новом документе Ростехнадзора остался без изменений.

положительной фазы сжатия ВУВ (t'_p) от параметра Сахса (R_x). При этом все взрывы разбиваются на 10 классов (табл. 1) [29].

Т а б л и ц а 1
Классификация взрывоопасных ситуаций по TNO [29]

Класс	Условия воспламенения ¹	Загромождение пространства ²	Параллельное ограничение ³	Вид окружающего пространства ⁴
7–10	Благоприятные	Сильное	Есть	Замкнутое
7–10	Благоприятные	Сильное	Нет	Незамкнутое
5–7	Малоблагоприятные	Сильное	Есть	Замкнутое
5–7	Благоприятные	Слабое	Есть	Замкнутое
4–6	Благоприятные	Слабое	Нет	Незамкнутое
4–6	Благоприятные	Нет	Есть	Замкнутое
4–5	Малоблагоприятные	Сильное	Нет	Незамкнутое
4–5	Благоприятные	Нет	Нет	Замкнутое
3–5	Малоблагоприятные	Слабое	Есть	Замкнутое
2–3	Малоблагоприятные	Слабое	Нет	Незамкнутое
1–2	Малоблагоприятные	Нет	Есть	Замкнутое
1	Малоблагоприятные	Нет	Нет	Незамкнутое

Примечания: 1. «Благоприятные» – любой источник зажигания в условиях ограниченного вентилирования. «Малоблагоприятные» – открытый источник зажигания (искра, открытое пламя, нагретая поверхность и т.п.).

2. «Сильное» – в области взрывоопасного облака присутствуют многочисленные препятствия, затрудняющие его свободное перемещение. При этом более 30 % суммарного объема ТВС находится на территории с препятствиями и преградами, расстояние между которыми составляет не более 3 м. «Низкое» – в ТВС присутствуют препятствия и преграды. Расстояние между ними составляет более 3 м. Суммарный объем газо- и паровоздушного облака на территории с препятствиями и преградами не превышает 30 %. «Нет» – в ТВС нет преград и препятствий для его свободной диффузии. В адаптации к подходу Ростехнадзора классификацию TNO загромождения пространства (сильное – слабое – нет) следует трактовать, как «сильное – среднее – слабое (нет)» [21].

3. «Есть» – ТВС ограничена стенами или барьерами с двух или трех сторон. «Нет» – ограничения для взрывоопасного облака, за исключением поверхности земли (пола), отсутствуют.

4. «Замкнутое» – помещение. «Незамкнутое» – открытое пространство.

Синтез-методика

Для создания синтез-методики, в которой сочетаются подходы методов Дорофеева и МЕ-TNO, необходимо вычленив режим детонации в методе МЕ-TNO и заменить его на подход Дорофеева. Формально в МЕ-TNO нет разделения взрывов ТВС на детонацию и дефлаграцию [29]. Однако понятно, что взрывы

высоких классов (см. табл. 1) будут соответствовать режиму детонации. Для решения этой задачи воспользуемся подходом Ростехнадзора, который для дефлаграционных взрывов ТВС предусматривает выбор наименьшего значения P_x , которое получается при вычислении по формулам для взрывного превращения в режимах детонации и дефлаграции [27, 28]. При этом учтем, что уравнение (5) начинает действовать при $R_x \geq 0,33$ [25, 26]. Поскольку в методе МЕ-TNO показатель I_x не определяется, то для сравнительного анализа выбран только один параметр – приведенное давление взрыва P_x . Расчеты выполнены с помощью Excel 2010 и ранее разработанной компьютерной программы «Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей» [30] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
Результаты расчетов P_x по методам Дорофеева и МЕ-TNO при $R_x = 0,33$

Параметр	Дорофеев	МЕ-TNO			
		Класс взрыва			
		10	9	8	7
P_x	2,15	6,23	4,66	2,00	1,00

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод, что 9-й и 10-й классы взрывов по TNO относятся к режиму детонации ТВС. Таким образом, 10-й класс в синтез-методике, которая объединяет подходы Дорофеева и МЕ-TNO, исключается, а 9-й класс заменяется на метод Дорофеева. С помощью программы TableCurve 2D (версия 5.01.05) установлено, что приведенное давление взрыва в синтез-методике хорошо описывается уравнением с коэффициентами корреляции (0,998–0,999):

$$P_x = a + \frac{b}{R_x} + \frac{c}{(R_x)^2} + \frac{d}{(R_x)^3} + \frac{e}{(R_x)^4} + \frac{f}{(R_x)^5} + \frac{g}{(R_x)^6} + \frac{h}{(R_x)^7}. \quad (9)$$

Таким образом, избыточное давление взрыва может быть рассчитано, в зависимости от класса взрывного превращения, по формуле

$$\Delta P = P_0 \left(a + \frac{b}{R_x} + \frac{c}{(R_x)^2} + \frac{d}{(R_x)^3} + \frac{e}{(R_x)^4} + \frac{f}{(R_x)^5} + \frac{g}{(R_x)^6} + \frac{h}{(R_x)^7} \right), \quad (10)$$

где $a-h$ – эмпирические константы, зависящие от класса взрывного превращения (табл. 3).

Таблица 3

Эмпирические константы для уравнения (9)

Класс	Константы							
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
9*	-0,00113	0,14003	0,42948	-0,26310	0,13025	-0,03291	0,00326	0,00000
8	-0,00115	0,18519	1,03553	-3,31372	4,53397	-2,52705	0,61063	-0,05355
7	-0,00486	0,42504	-1,21857	3,18796	-2,77262	1,10151	-0,20798	0,01517
6	0,00106	0,16827	0,51056	-0,48531	0,17496	-0,02869	0,00178	0,00000
5	0,00067	0,10223	0,06329	-0,04327	0,00138	0,00274	-0,00039	0,00000
4	-0,00017	0,07668	-0,05025	0,09424	-0,07766	0,02803	-0,00462	0,00028
3	-0,00002	0,03459	0,00359	-0,01747	0,02022	-0,01163	0,00298	-0,00027
2	0,00078	0,00542	0,03084	-0,03664	0,01947	-0,00577	0,00093	-0,00006
1	-0,00017	0,01057	-0,01574	0,02993	-0,02616	0,01087	-0,00215	0,00016

Примечание. * – режим детонации.

Заключение

С помощью синтез-метода предложено новое уравнение для расчета избыточного

давления взрыва, которое более точно прогнозирует последствия взрывов ТВС на объектах нефтегазовой, нефтехимической и химической отраслей промышленности.

Библиографический список

1. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
2. Акинин Н.И., Булхов Н.Н., Гериш В.А. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 10. – С. 53–55.
3. Акинин Н.И., Бабайцев И.В. Техносферная безопасность. Основы прогнозирования взрывоопасности парогазовых смесей. – Долгопрудный: Интеллект, 2016. – 248 с.
4. Eckhoff R.K. Explosion hazards in the process industries. – Houston: Gulf Publishing Co., 2005. – 468 p.
5. Nolan D.P. Handbook of fire & explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, & related facilities. – Westwood: Noyes Publications, 1996. – 305 p.
6. Casal J. Evolution of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 379 p.
7. Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst. – New York: John Wiley & Sons, Inc.: AICE, 2010. – 456 p.
8. Assael M.J., Kakosimos K.E. Fires, explosions, and toxic gas dispersions. Effects calculation and risk analysis. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 345 p.
9. Crowl D.A. Understanding explosions. – N.Y.: AICE, 2003. – 221 p.
10. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosion, flash fire, and BLRVs. – N.Y.: AICE, 1994. – 401 p.
11. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. I. РБ Г-05-039-96 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 5. – С. 37–47.
12. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. II. РД 03-409-01 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 1. – С. 21–27.
13. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. III. СП 12.13130.2009 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 33–38.
14. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. IV. ГОСТ Р 12.3.047-98 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 6. – С. 34–37.
15. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. V. ПБ 09-540-03 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 8. – С. 32–35.
16. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VI. ТНО-методы (часть 1) / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, С.А. Тимашев, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 7. – С. 22–29.
17. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VII. BST-методы / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 12. – С. 23–30.
18. Методы оценки взрывоопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2 / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, Е.С. Гурьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 3. – С. 6–12.
19. Сравнительный анализ методик прогнозирования последствий взрывов газопаровоздушных смесей / С.Г. Алексеев, Е.С. Гурьев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин // Проблемы анализа риска. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 12–19.

20. Алексеев С.Г., Гурьев Е.С., Барбин Н.М. Еще раз о сравнении методик прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей // Проблемы анализа риска. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 56–70.

21. Сравнительный анализ методик прогнозирования VCE на примере взрыва во Фликсборо / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, Е.Ю. Полищук // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 5. – С. 24–35.

22. Верификация методик прогнозирования последствий на примере реального взрыва изопентана / С.Г. Алексеев, Е.С. Гурьев, Н.М. Барбин, Л.О. Животинская // Техносферная безопасность. – 2015. – № 2 (7). – С. 22–23.

23. Сравнительный анализ методов прогнозирования на примерах реальных взрывов / С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, В.Н. Литвинов, Н.Н. Грачева, Н.Б. Руденко, И.В. Орищенко, Н.М. Барбин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 7. – С. 16–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26.

24. Dorofeev S.B. Blast effect of confined and unconfined explosions // Proc. 20-th ISSW “Shock Waves” / by ed. B. Sturtevant, J. Shepherd, and H. Hornung. – Singapore: Scientific Publishing Co., 1996. – Vol. 1. – P. 77–86.

25. Dorofeev S.B. A flame speed correlation for unconfined gaseous explosions // Process Safety

Progress. – 2007. – Vol. 26, № 2. – P. 140–149. DOI: 10.1002/prs.10176.

26. Dorofeev S.B. Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32, № 13. – P. 2118–2124. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.003.

27. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 № 25) [Электронный ресурс]. – URL: КонсультантПлюс.

28. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – Серия 27. Вып. 9. – 44 с.

29. Methods for the calculation of physical effects. “Yellow book” / by ed. C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings. – Hague: Gevaarlijke Stoffen, 2005. – 870 p.

30. Расчет параметров взрыва газопаро-воздушных смесей: свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663043 (дата поступления заявки 17.10.2016, дата регистрации в госреестре 28.11.2016) / С.Г. Алексеев, Н.М. Барбин, С.А. Авдеев, С.В. Субачев // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: Бюллетень ФИПС. – 2016. – № 12.

References

1. Beschastnov M.V. Promyshlennye vzryvy. Otsenka i preduprezhdenie [Industrial explosions. Assessment and warning]. Moscow, Khimiia, 1991, 432 p.

2. Akinin N.I., Bulkhov N.N., Gerish V.A. Statisticheskii analiz prichin avarii i travmatizma na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh [Statistical analysis of the causes of accidents and injuries at hazardous production facilities]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010, vol. 9, no.10, pp.53-55.

3. Akinin N.I., Babaitsev I.V. Tekhnosfernaia bezopasnost'. Osnovy pro-gnozirovaniia vzryvoopasnosti parogazovykh smesei [Technospheric safety. Basics of the prediction of the explosion hazard of combined-gas mixtures]. *Dolgoprudnyi, Intellekt*, 2016, 248 p.

4. Eckhoff R.K. Explosion hazards in the process industries. Houston, Gulf Publishing Co., 2005, 468 p.

5. Nolan D.P. Handbook of fire & explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, & related facilities. Westwood, Noyes Publications, 1996, 305 p.

6. Casal J. Evolution of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Amsterdam, Elsevier, 2008, 379 p.

7. Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst. N.Y., John Wiley & Sons, Inc., AICE, 2010, 456 p.

8. Assael M.J., Kakosimos K.E. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions. Effects Calculation and Risk Analysis. Boca Raton, CRC Press, 2010, 345 p.

9. Crowl D.A. Understanding Explosions. N.Y., AICE, 2003, 221 p.

10. Guidelines for evaluating the Characteristics of vapor cloud explosion, Flash Fire, and BLEVEs. N.Y., AICE, 1994, 401 p.

11. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesei na primere kerosina marki RT. I. RB G-05-039-96 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. I. RB G-05-039-96]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010, vol.19, no.5, pp.37-47.

12. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesei na primere kerosina marki RT. II. RD 03-409-01 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. II. RD 03-409-01]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2011, vol.20, no.1, pp.21-27.

13. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesei na primere kerosina marki RT. III. SP 12.13130.2009 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. III. SP 12.13130.2009]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2012, vol.21, no.1, pp.33-38.

14. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesei na primere kerosina marki RT. IV. GOST R 12.3.047-98 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. IV. GOST R 12.3.047-98]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2012, vol.21, no.6, pp. 34-37.

15. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesei na primere kerosina marki

RT. V. PB 09-540-03 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. V. PB 09-540-03]. *Pozharovryvbezopasnost*, 2012, vol.21, no.8, pp.32-35.

16. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Timashev S.A., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzyvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. VI. TNO-metody (chast 1) [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. VI. TNO methods (part 1)]. *Pozharovryvbezopasnost*, 2013, vol.22, no.7, pp.22-29.

17. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzyvopozharoopasnosti top-livovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT.VII. BST metody [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. VII. BST methods]. *Pozharovryvbezopasnost*, 2013, vol.22, no.12, pp.23-30.

18. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Guryev Ye.S. Metody otsenki vzyvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. VIII. Sravnenie metodov Dorofeeva, RD 03-409-01 i BST2 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for Jetfuel RT. VIII. Comparison of methods of Dorofeev, RD 03-409-01 and BST2]. *Pozharovryvbezopasnost*, 2015, vol.24, no.3, pp. 6-12.

19. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Guryev Ye.S., Barbin N.M. Sravnitel'nyy analiz metodik prognozirovaniya posledstviy vzyvov gazoparovozdushnykh smesey [Comparative analysis of forecasting methods for aftereffects of vapor cloud explosions]. *Problemy analiza riska*, 2013, vol.10, no.4, pp.12-19.

20. Alexeev S.G., Guryev Ye.S., Barbin N. M. Eshche raz o sravnenii metodik prognozirovaniya posledstviy vzyvov toplivovozdushnykh smesey [About comparison of methods of forecasting of consequences of vapor cloud explosions again]. *Problemy analiza riska*, 2015, vol.12, no.2, pp.56-70.

21. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M., Polishchuk E.Yu. Sravnitel'nyy analiz metodik prognozirovaniya VCE na primere vzyva vo Fliksboro [Comparative analysis of techniques of forecasting vce on an explosion example in Flixborough]. *Pozharovryvo-bezopasnost*, 2015, vol.24, no.5, pp.24-35.

22. Alexeev S.G., Guryev Ye.S., Barbin N.M., Zhivotinskaya L.O. Verifikatsiya metodik prognozirovaniya posledstviy na primere real'nogo vzyva izopentana

[Verification of techniques of forecasting of consequences on the example of real explosion of isopentane]. *Tekhnosfernaya bezopasnost*, 2015, no.2 (7), pp.22-23.

23. Alexeev S.G., Avdeev A.S., Litvinov V.N., Gracheva N.N., Rudenko N.B., Orishchenko I.V., Barbin N.M. Sravnitel'nyy analiz metodov prognozirovaniya na primerakh real'nykh vzyvov [Comparative analysis of techniques of forecasting VCE on example of real explosions]. *Pozharovryvbezopasnost'*, 2016, vol.25, no.7, pp.16-26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26.

24. Dorofeev S.B. Blast effect of confined and unconfined explosions. *Proc. 20-th ISSW "Shock Waves"*. Ed by ed. B. Sturtevant, J. Shepherd, H. Hornung. Singapore, Scientific Publishing Co., 1996. vol.1, pp.77-86.

25. Dorofeev S.B. A flame speed correlation for unconfined gaseous explosions. *Process Safety Progress*, 2007, vol.26, no.2, pp.140-149. DOI: 10.1002/prs.10176.

26. Dorofeev S.B. Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol.32, no.13, pp.2118-2124. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.003.

27. RD 03-409-01. Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzyvov toplivno-vozdushnykh smesey [Procedure for assessing the consequences of accidental explosions of fuel and air mixtures], available at: <http://www.consultant.ru>.

28. Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzyvov toplivno-vozdushnykh smesey». Seriya 27. Vypusk 9 [Safety Manual "Methods for assessing the consequences of accidental explosions of fuel and air mixtures." Series 27. Issue 9]. Moscow, ZAO NTTs PB, 2015, 44 p.

29. Methods for the Calculation of Physical Effects. "Yellow Book". Ed. by C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings. Hague, Gevaarlijke Stoffen, 2005, 870 p.

30. Alexeev S.G., Barbin N.M., Avdeev S.A., Subachev S.V. Raschet parametrov vzyva gazoparovozdushnykh smesey. Svidetel'stvo RF o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no.2016663043 [Calculation of explosion parameters of gas-air-air mixtures. Certificate of the Russian Federation on the state registration of the computer program No. 2016663043.]. Byulleten' FIPS "Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii inte-gral'nykh mikroskhem", 2016, no.12.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Алексеев С.Г., Авдеев А.С., Барбин Н.М. Новое уравнение для определения избыточного давления взрыва топливовоздушных смесей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №3. – С.274–279. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.8

Please cite this article in English as:

Alexeev S.G., Avdeev A.S., Barbin N.M. New equation for determination of overpressure of fuel-air mixture blast. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.3, pp.274-279. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.8