

С. Г. АЛЕКСЕЕВ, канд. хим. наук, доцент, чл.-корр. ВАН КБ, старший научный сотрудник Научно-инженерного центра “Надежность и ресурс больших систем и машин” УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: Alexshome@mail.ru)

А. С. АВДЕЕВ, начальник сектора Судебно-экспертного учреждения ФПС “Испытательная пожарная лаборатория по Пермскому краю” (Россия, 614990, г. Пермь, ул. Большевикская, 53а); аспирант Научно-инженерного центра “Надежность и ресурс больших систем и машин” УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а; e-mail: asipl@ugps.perm.ru)

Н. М. БАРБИН, д-р техн. наук, канд. хим. наук, заведующий кафедрой химии Уральской государственной сельскохозяйственной академии (Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: NMBarbin@mail.ru)

Е. С. ГУРЬЕВ, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора Научно-инженерного центра “Надежность и ресурс больших систем и машин” УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а; e-mail: sec@wekt.ru)

УДК 614.84:665.74

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНОСТИ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ПРИМЕРЕ КЕРОСИНА МАРКИ РТ. VIII. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДОРОФЕЕВА, РД 03-409-01 И BST2¹

Выполнен расчет параметров взрыва паров авиакеросина по методам Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2. Показано, что подходы Дорофеева и РД 03-409-01 плохо согласуются с методом BST2. Выполнена верификация этих методов на примере взрыва паров растворителя, который произошел 22 ноября 2006 г. на предприятии CAI в г. Дэнверс штата Массачусетс. Показано, что при известной скорости распространения пламени подходы Дорофеева и РД 03-409-01 дают удовлетворительные прогнозы радиусов зон разрушения.

Ключевые слова: взрыв; керосин; топливовоздушная смесь; избыточное давление; гептан.

В предыдущих работах [1–7] нами были проанализированы возможности отечественных расчетных методов Госатомнадзора, Госгортехнадзора и МЧС России и методик нидерландской организации прикладных научных исследований TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) и BST (Baker–Strehlow–Tang) на примере решения задачи, связанной с разлитием авиационного топлива марки РТ.

В настоящей статье продолжено рассмотрение возможностей существующих методик оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей (далее — ТВС). Объектом настоящего исследования выбран метод Дорофеева [8–10], который разрабатывался параллельно с методами ME–TNO (multi-energy) и BST и может рассматриваться как потен-

циальная альтернатива им. Следует заметить, что только в методиках Дорофеева [8–10], РД 03-409-01 (далее — РД) [11] и BST [12–16] заложена взаимосвязь параметров взрыва со скоростью распространения пламени (flame speed). Именно поэтому для сравнительного анализа выбраны эти методы. Ранее нами было отмечено [17, 18], что узким местом отечественных и зарубежных методик является способ определения массы горючего вещества в паровоздушном облаке, поэтому сравнение выполнено для стехиометрической концентрации 500 кг паров керосина РТ.

В методе Дорофеева для определения избыточного давления взрыва используются уравнения [8–10] для разных режимов взрыва:

$$R^* = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}; \quad (1)$$

$$\Delta P = P^* P_0; \quad (2)$$

¹ Продолжение. Начало см. в журнале “Пожаровзрывобезопасность”, № 5 за 2010 г., № 1 за 2011 г., № 1, 6 и 8 за 2012 г., № 7 и 12 за 2013 г.

- детонация:

$$P^* = \frac{0,34}{(R^*)^{4/3}} + \frac{0,062}{(R^*)^2} + \frac{0,0033}{(R^*)^3}; \quad (3)$$

- гетерогенная детонация:

$$P^* = \frac{0,125}{R^*} + \frac{0,137}{(R^*)^2} + \frac{0,023}{(R^*)^3}; \quad (4)$$

- дефлаграция:

$$P^* = \left(\frac{u}{c_0} \right)^2 \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R^*} - \frac{0,14}{(R^*)^2} \right), \quad (5)$$

где R^* — параметр Сахса (Sach);

R — расстояние от центра взрыва, м;

E — энергия взрыва, Дж/кг; для авиакеросина $(E/P_0)^{1/3} = 71,634$ [6];

P_0 — нормальное давление, кПа; $P_0 = 101$ кПа [1];

P^* — приведенное максимальное давление взрыва;

ΔP — избыточное давление взрыва, кПа;

u — скорость распространения пламени, м/с;

c_0 — скорость звука в воздушной среде, м/с;

$c_0 = 340$ м/с [11];

σ — коэффициент расширения; для газовых смесей $\sigma = 7$ [11]²;

$\sigma = \rho_{\text{пр}} / \rho_p$;

$\rho_{\text{пр}}$ — плотность продуктов сгорания при температуре горения, кг/м³;

ρ_p — плотность горючей смеси (реагентов) при начальной температуре, кг/м³.

Необходимо отметить, что уравнения (4) и (5) идентичны формулам из РД 03-409-01 (пп. 2.3.1 и 2.3.2) [11]. Однако в подходе Дорофеева для дефлаграционных взрывов предлагается руководствоваться выбором минимального приведенного давления взрыва P^* с помощью соотношения

$$P^* = \min(P_1^*, P_2^*), \quad (6)$$

где P_1^* , P_2^* — приведенные давления взрыва, найденные по формулам (3) и (5) соответственно.

В методе Дорофеева также используется полуэмпирический способ определения возможной скорости распространения пламени с помощью уравнения [9]:

$$u = a^2 b \sigma (\sigma - 1) S_L \left[1 + \frac{4 \sigma y R^\alpha}{3 x (\sigma x)^\alpha} \right]^2 \left(\frac{L_T}{\delta} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

² Допущение РД [11], что $\sigma = 7$, согласуется с литературными данными [9, 19] ($\sigma = 7 \div 8$ для углеводородных топлив) и результатом расчета для авиакеросина РТ ($\sigma = 8$) в приближении к равновесному составу продуктов при постоянном давлении в замкнутом объеме по описанному в [20] методу. Расчет σ через нижний концентрационный предел воспламенения и стехиометрическую концентрацию [21] для авиакеросина РТ дает заниженное значение σ .

Таблица 1. Значения коэффициентов y и x [9]

Степень загроможденности	Характеристика окружающего пространства		x , м	y , м
	Степень блокирования его объема, %	Расстояние между преградами, м		
Низкая (low congestion)	Менее 2	Более 2	16	4
Средняя (medium congestion)	2–6	0,5–2,0	3	1
Высокая (high congestion)	Более 6	Менее 0,5	0,5	0,25

где a , b , α — полуэмпирические коэффициенты, определяемые на основании экспериментальных данных;

S_L — ламинарная скорость горения, м/с;

y , x — параметры загроможденности пространства (табл. 1);

L_T — интегральная длина (масштаб) турбулентности;

δ — толщина ламинарного слоя горения;

$\delta = v / L_T$;

v — кинематическая вязкость, м²/с.

Однако для нашей расчетной аварийной ситуации применение уравнения (7) невозможно из-за отсутствия данных по параметрам a , b , α , S_L , L_T и δ для авиакеросина РТ, поэтому расчет выполнен для режимов как детонации, так и дефлаграции при различных скоростях распространения пламени (табл. 2). Для сравнения в табл. 2 приведены округленные до 1 м значения радиусов зон разрушений в зависимости от избыточного давления взрыва, полученные по методам РД [11] и BST2³. Методика РД [11] не предполагает реализации взрыва паровоздушной смеси керосина РТ в режиме детонации, поэтому для сравнения с методом Дорофеева приведен также расчет для этого режима взрыва ТВС. В связи с тем что в методах РД [11] и BST2 при расчетах используются разные значения скорости распространения пламени, для корректного отражения возможностей подхода Дорофеева прогнозирование выполнено при тех же скоростях распространения пламени, которые заданы в методиках сравнения.

Из табл. 2 видно, что предсказания радиусов зон разрушения по оценочному методу тротилового эквивалента (ТНТ) [11] не согласуются с результатами прогноза по BST2, другим методикам РД [11] и методу Дорофеева. При взрыве стехиометрической смеси 500 кг паров авиакеросина РТ значения радиуса разрушений 1-го класса по методам РД [11] и Доро-

³ BST2 — это последняя версия BST-методов (классификация BST-методов приведена в работе [7]). Расчет выполнен с помощью программы “FreeBST” компании “TAM Consulting, L.L.C.”.

Таблица 2. Результаты прогноза радиусов зон разрушений в методе BST2

Класс зоны разрушений (P , кПа)	Значение R , м, по методу			
	Дефлаграция		Детонация	
	BST2/ Дорофеева	РД/ Дорофеева	РД/ТНТ	Дорофеева
1 (≥ 100)	33/41 ¹ 17/34 ²	39/39 ⁹	37/40	41
2 (70)	35/52 ¹ 30/52 ²	66/52 ⁹	40/59	52
3 (28)	74/98 ¹ 62/98 ² 51/69 ³ 35/40 ⁴	191/98 ⁹ 76/76 ¹⁰	49/101	98
4 (14)	135/160 ¹ 118/160 ² 104/155 ³ 81/103 ⁴ 69/82 ⁵ 64/70 ⁶ 60/59 ⁷	396/160 ⁹ 168/160 ¹⁰ 50/50 ¹¹	58/295	160
5 (≤ 2)	> 551/644 ¹⁻³ 474/644 ⁴ 424/644 ⁵ 399/584 ⁶ 364/510 ⁷ 187/214 ⁸	2786/644 ⁹ 1231/644 ¹⁰ 444/444 ¹¹ 157/157 ¹²	96/591	644

Примечания:

1. Жирным шрифтом выделены значения, полученные по уравнению (3) в соответствии с условием $P^* = \min(P_1^*, P_2^*)$.
2. Индексами "1–8" обозначены радиусы, полученные при Эйлеровом числе Маха M_f : 1 — 1,60; 2 — 1,00; 3 — 0,66; 4 — 0,55; 5 — 0,50; 6 — 0,47; 7 — 0,44; 8 — 0,29.
3. Индексами "9–12" обозначены радиусы, полученные при скорости распространения пламени: 9 — 300 м/с; 10 — 200 м/с; 11 — 121 м/с; 12 — 73 м/с.

феева совпадают и практически не зависят от режима взрыва. Методика BST2 дает значения радиуса для этого класса зоны разрушений на 10–54 % меньше, чем методы РД [11] и Дорофеева.

В случае разрушений 2-го класса можно отметить удовлетворительное совпадение прогнозов R только по методу BST2 при $M_f = 1,6$ и по методике РД [11] для режима детонации. Для этого же режима подход Дорофеева дает завышенные прогнозы R для классов зон разрушения 2–5 по сравнению с методиками BST2 и РД [11], включая ТНТ-метод. В случае дефлаграционных взрывов полученные по BST2 значения R для 2–5-го классов зон разрушения меньше по сравнению с подходами РД [11] и Дорофеева.

Оценивая полученные результаты в целом, можно отметить, что методы РД [11] и Дорофеева не имеют удовлетворительной согласованности с методикой BST2.

Для отдачи предпочтения одному из рассмотренных методов выполнена верификация методик про-



Место происшествия на территории предприятий CAI и Arnel Manufacturing Facility (г. Дэнверс штата Массачусетс США)

гнозирования последствий взрывов парогазовоздушных смесей на примере реальной промышленной аварии, которая произошла 22 ноября 2006 г. около 3 ч ночи (2:46 am) на территории предприятий CAI и Arnel Manufacturing Facility, находящихся на одной производственной площадке, в г. Дэнверс (Danvers), который расположен в 20 милях от Бостона (Boston) в штате Массачусетс США. В результате взрыва пострадали 10 человек и 30 зданий (см. рисунок) [22].

Изучением данного случая занималось независимое американское федеральное агентство по расследованию инцидентов в химической промышленности CSB (Chemical Safety and Hazard Investigation Board). Сотрудниками CSB установлено, что в результате нарушения технологического процесса на предприятии CAI произошел несанкционированный выброс паров растворителя, используемого для производства чернил для принтеров, с образованием паровоздушного облака. Контакт облака с горячей поверхностью нагревательного элемента промышленного теплоэлектровентилятора привел к взрыву. Экспертами CSB на основании критического анализа картины разрушений и повреждений в районе инцидента были определены радиусы зон разрушений (табл. 3) [22]. Было также установлено, что основным компонентом в паровом облаке был гептан.

На основании данных о взрыве на предприятии CAI (385,554 кг паров гептана, температура воздуха 291,5 К) нами выполнен прогноз зон повреждений методами BST2, РД [11] и Дорофеева (см. табл. 3). Прогнозы по BST2 выполнены для 2,5D-конфигурации взрывного превращения. Как видно из табл. 3, метод BST2 дает хороший прогноз только для случая сильно загроможденного пространства, однако данные отчета [22] говорят о том, что место происшествия не соответствует этим требованиям.

В РД [11], в котором приведена классификация горючих веществ по степени чувствительности, геп-

Таблица 3. Радиусы зон разрушения, прогноз избыточно-го давления в них и его погрешность Δ на предприятиях CAI и Arnel Manufacturing Facility

Данные CSB		Прогноз ΔP , кПа			
R , ft (м)	ΔP , psi (кПа)	BST2	Δ , %	РД, Дорофеев	Δ , %
365 (111,3)	2,3 (15,9)	9,34 ¹ 14,65 ²	41 8	18,9 ³ 10,6 ⁴ 14,2 ⁵	19 33 11
581 (177,0)	1,2 (8,3)	5,45 ¹ 8,37 ²	34 1	12,4 ³ 7,0 ⁴ 9,3 ⁵	49 16 12

Примечания:

1. Индексами “1”, “2” обозначены значения, полученные соответственно при средней и высокой степени загроможденности пространства.
2. Индексами “4”, “5” и “6” обозначены значения, полученные при скорости распространения пламени соответственно 200; 150 и 173 м/с.

тан отсутствует. Однако его ближайшие гомологи (гексан и октан) попадают в 3-й класс [11], поэтому и гептан был отнесен нами к этому же классу. Согласно РД [11] исследуемый взрыв в условиях средней степени загроможденности пространства должен происходить в режиме дефлаграции со скоростью распространения пламени $u = 150 \div 200$ м/с [11]. Для данного случая расчетные подходы методов РД и Дорофеева полностью совпадают. Расчеты при предельных значениях u дают ошибку от 16 до 49 %. Выбор скорости распространения пламени $u = 173$ м/с позволяет уменьшить ошибку прогнозов до приемлемых значений (11–12 %).

В заключение можно сделать вывод, что методы Дорофеева и РД 03-409–01 при известной скорости распространения пламени позволяют прогнозировать последствия взрывов газопаровоздушных смесей в режиме дефлаграции с приемлемой точностью в отличие от методики BST2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. I. РБ Г-05-039–96 // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т. 19, № 5. — С. 37–47.
2. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. II. РД 03-409–01 // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 1. — С. 21–27.
3. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. III. СП 12.13130.2009 // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 33–38.
4. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. IV. ГОСТ Р 12.3.047–98 // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 6. — С. 34–37.
5. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. V. ПБ 09-540–03 // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 32–35.
6. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Тимашев С. А., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VI. TNO-методы (часть 1) // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 7. — С. 22–29.
7. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VII. BST-методы // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 23–30.
8. Dorofeev S. B. Blast effect of confined and unconfined explosions // Proc. 20th ISSW “Shock waves” / Eds. B. Sturtevant, J. Shepherd, and H. Hornung. — Singapore : Scientific Publishing Co., 1996. — Vol. 1. — P. 77–86.
9. Dorofeev S. B. A flame speed correlation for unconfined gaseous explosions // Process Safety Progress. — 2007. — Vol. 26, No. 2. — P. 140–149. doi: 0.1002/prs.10176.
10. Dorofeev S. B. Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions // International Journal of Hydrogen Energy. — 2007. — Vol. 32, No. 13. — P. 2118–2124. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.003.
11. РД 03-409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : постановление Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 № 25. URL : <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=334178> (дата обращения: 10.10.2014).
12. Baker Q. A., Tang M. J., Scheier E. A., Silva G. J. Vapor cloud explosion analysis // Process Safety Progress. — 1996. — Vol. 15, No. 2. — P. 106–109. doi: 10.1002/prs.680150211.

13. *Baker Q. A., Doolittle C. M., Fitzgerald G. A., Tang M. J.* Recent developments in the Baker-Strehlow VCE analysis methodology // *Process Safety Progress*. — 1998. — Vol. 17, No. 4. — P. 297–301. doi: 10.1002/prs.680170411.
14. *Tang M. J., Baker Q. A.* A new set of blast curves from vapor cloud explosion // *Process Safety Progress*. — 1999. — Vol. 18, No. 3. — P. 235–240. doi: 10.1002/prs.680180412.
15. *Tang M. J., Baker Q. A.* Comparison of blast curves from vapor cloud explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2000. — Vol. 13, No. 3–5. — P. 433–438. doi: 10.1016/S0950-4230(99)00040-6.
16. *Pierorazio A. J., Thomas J. K., Baker Q. A., Ketchum D. E.* An update to the Baker–Strehlow–Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table // *Process Safety Progress*. — 2005. — Vol. 24, No. 1. — P. 59–65. doi: 10.1002/prs.10048.
17. *Алексеев С. Г., Гурьев Е. С., Авдеев А. С., Барбин Н. М.* Сравнительный анализ методик прогнозирования последствий взрывов газопаровоздушных смесей // *Проблемы анализа риска*. — 2013. — Т. 10, № 4. — С. 12–19.
18. *Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Гурьев Е. С.* Сравнительный анализ методов прогнозирования VCE // *Безопасность критичных инфраструктур и территорий : Материалы VI Всероссийской конференции и XVI школы молодых ученых*. — Екатеринбург / Абзаково : УрО РАН, 2014. — С. 11.
19. *Sharma R. K., Gurjar B. R., Wate S. R., Ghuge S. P., Agrawal R.* Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. Accident at Jaipur, India // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2013. — Vol. 26, No. 1. — P. 82–90. doi: 10.1016/j.jlp.2012.09.009.
20. *Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б.* Водород: параметры горения и взрыва. — М. : Физматлит, 2008. — С. 26.
21. *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.
22. Confined vapor cloud explosion (10 injured, 24 houses, and six businesses destroyed) CAI, Inc. and Arnel Company, Inc. // Report No 2007-03-I-MA. — Washington : CSB, 2007. — 122 p.

Материал поступил в редакцию 1 декабря 2014 г.

English

ANALYSIS METHODS OF EXPLOSION FIRE HAZARD OF MIXTURES OF FUEL AND AIR ON AN EXAMPLE FOR JET FUEL RT. VIII. COMPARISON OF METHODS OF DOROFEEV, RD 03-409-01 AND BST2

ALEXEEV S. G., Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of WASCs, Senior Researcher of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation); Senior Researcher of Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: Alexshome@mail.ru)

AVDEEV A. S., Leader of Sector for Research and Testing in the Field of Fire Safety of Forensic Expert Establishment of Federal Fire Service – “Testing Fire Laboratory for the Perm Territory” (Bolshevistskaya St., 53a, Perm, 614990, Russian Federation); Postgraduate Student of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation; e-mail address: asipl@ugps.perm.ru)

BARBIN N. M., Doctor of Technical Sciences, Candidate of Chemistry Sciences, Head of Chemistry Department, Urals State Agricultural Academy (Karla Libknekhta St., 42, Yekaterinburg, 620075, Russian Federation); Senior Researcher, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: NMBarbin@mail.ru)

GUR'YEV E. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of Science and Engineering Centre "Reliability and Safety of Large Systems" of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation; e-mail address: sec@wekt.ru)

ABSTRACT

The comparative analysis of methods of Dorofeev, RD 03-409-01 and BST2 is made on an example of the settlement contingency situation of vapor cloud explosion of 500 kg jet fuel. Values of radius of destructions of the 1st class on methods RD 03-409-01 and Dorofeev coincide and practically do not depend on an explosion mode. The BST2-technique yields values of radius R for this class of a zone of destructions on 10–54 % less, than methods RD 03-409-01 and Dorofeev. Satisfactory coincidence of forecasts R only on method BST2 at $M_f = 1,6$ and by technique RD 03-409-01 for a detonation mode is marked for destructions of the 2nd class. For the same mode, the Dorofeev's approach yields overestimated forecasts R for classes of zones of destruction 2–5 in comparison with techniques BST2 and RD 03-409-01, including the TNT-method. In a case deflagration received on the BST2 values R for 2–5 classes of zones of destruction are less than explosions in comparison with approaches RD 03-409-01 and Dorofeev. Verification of these methods is executed on an instance of vapor explosion of a solvent, which has occurred on November 22nd, 2006 at the CAI factory in Danvers, Massachusetts. The approach of methods of Dorofeev and RD 03-409-01 yields the satisfactory forecast of radiuses of bands of fracture at the known flame speed.

Keywords: explosion; kerosene; fuel-air mixture; blast pressure; heptane.

REFERENCES

1. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvo-pozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. I. RB G-05-039-96 [Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jet fuel RT. I. RB G-05-039-96]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 37–47. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpvb2010> (Accessed 10 January 2013).
2. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvo-pozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. II. RD 03-409-01 [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. II. RD 03-409-01]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 21–27. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpvb2011> (Accessed 10 January 2013).
3. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvo-pozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. III. SP 12.13130.2009 [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. III. SP 12.13130.2009]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 33–38. Available at: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1008238> (Accessed 10 January 2013).
4. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopo-zharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. IV. GOST R 12.3.047-98 [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. IV. GOST R 12.3.047-98]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 6, pp. 34–37. Available at: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1025513> (Accessed 10 January 2013).
5. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvo-pozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. V. PB 09-540-03 [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. V. PB 09-540-03]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 32–35. Available at: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1031479> (Accessed 10 January 2013).
6. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvo-pozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. VI. TNO-metody (chast 1) [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. VI. TNO methods (part 1)]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 22–29.

7. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. VII. BST metody [Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. VII. BST methods]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 23–30.
8. Dorofeev S. B. Blast effect of confined and unconfined explosions. *Proc. 20th ISSW “Shock waves”* (Eds.: B. Sturtevant, J. Shepherd, and H. Hornung). Singapore, Scientific Publishing Co., 1996, vol. 1, pp. 77–86.
9. 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.
10. 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.
11. *Management Document 03-409-01. The prediction method for analysis of VCE damages*. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=334178> (Accessed 10 October 2014) (in Russian).
12. Baker Q. A., Tang M. J., Scheier E. A., Silva G. J. Vapor cloud explosion analysis. *Process Safety Progress*, 1996, vol. 15, no. 2, pp. 106–109. doi: 10.1002/prs.680150211.
13. Baker Q. A., Doolittle C. M., Fitzgerald G. A., Tang M. J. Recent developments in the Baker-Strehlow VCE analysis methodology. *Process Safety Progress*, 1998, vol. 17, no. 4, pp. 297–301. doi: 10.1002/prs.680170411.
14. Tang M. J., Baker Q. A. A new set of blast curves from vapor cloud explosion. *Process Safety Progress*, 1999, vol. 18, no. 3, pp. 235–240. doi: 10.1002/prs.680180412.
15. Tang M. J., Baker Q. A. Comparison of blast curves from vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, vol. 13, no. 3–5, pp. 433–438. doi: 10.1016/S0950-4230(99)00040-6.
16. Pierorazio A. J., Thomas J. K., Baker Q. A., Ketchum D. E. An update to the Baker–Strehlow–Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table. *Process Safety Progress*, 2005, vol. 24, no. 1, pp. 59–65. doi: 10.1002/prs.10048.
17. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Guryev Ye. S., Barbin N. M. Sravnitelnyy analiz metodik prognozirovaniya posledstviy vzryvov gazoparovozdushnykh smesey [Comparative analysis of forecasting methods for aftereffects of vapor cloud explosions]. *Problemy analiza riska — Issues of Risk Analysis*, 2013, vol. 10, no. 4, pp. 12–19.
18. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev Ye. S. Sravnitelnyy analiz metodik prognozirovaniya VCE [Comparative analysis of methods of forecasting VCE]. *Proceeding of VI All-Russian Science and Technology Conference and XVI School of Young Scientists “Safety of critical infrastructures and territories”*. Yekaterinburg, Abzakovo, Ural Branch Russian Academy of Sciences Publ., 2014, p. 11.
19. Sharma R. K., Gurjar B. R., Wate S. R., Ghuge S. P., Agrawal R. Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. Accident at Jaipur, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 82–90. doi: 10.1016/j.jlp.2012.09.009.
20. Gelfand B. E., Popov O. E., Chayvanov B. B. *Vodorod: parametry goreniya i vzryva* [Hydrogen: the parameters of combustion and explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, p. 26.
21. 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 58–64.
22. Confined vapor cloud explosion (10 injured, 24 houses, and six businesses destroyed) CAI, Inc. and Arnel Company, Inc. Report No 2007-03-I-MA. Washigton, CSB Publ., 2007. 122 p.