

**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: 59aas@mail.ru)

**В. Н. ЛИТВИНОВ**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой “Информационные технологии и управляющие системы”, Азово-Черноморский инженерный институт Донского государственного аграрного университета (Россия, 347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21; e-mail: LitvinovVN@rambler.ru)

**Н. Н. ГРАЧЕВА**, канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационные технологии и управляющие системы”, Азово-Черноморский инженерный институт Донского государственного аграрного университета (Россия, 347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21; e-mail: grann72@mail.ru)

**Н. Б. РУДЕНКО**, канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационные технологии и управляющие системы”, Азово-Черноморский инженерный институт Донского государственного аграрного университета (Россия, 347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21; e-mail: nelli-rud@yandex.ru)

**И. В. ОРИЩЕНКО**, канд. техн. наук, ассистент кафедры “Техносферная безопасность и физика”, Азово-Черноморский инженерный институт Донского государственного аграрного университета (Россия, 347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21; e-mail: Orishenkolina@mail.ru)

**Н. М. БАРБИН**, д-р техн. наук, канд. хим. наук, заведующий кафедрой химии Уральского государственного аграрного университета (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)

УДК 614.83:661.715.4

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ПРИМЕРАХ РЕАЛЬНЫХ ВЗРЫВОВ

Показано, что аварийный дефлаграционный взрыв, который произошел 22 ноября 2006 г. в г. Дэнверс (США), хорошо описывается ME-TNO-методом. Исследован взрыв, происшедший 28.07.1948 г. на предприятии BASF в Людвигсхафене (Германия) вследствие потери целостности емкости с диметиловым эфиром, с помощью методов федеральных норм и правил, ГОСТ Р 12.3.047–98, ГОСТ Р 12.3.047–2012, РД 03-409–01, ME-TNO, BST2 (Baker–Strehlow–Tang) и Дорофеева. Показано, что наилучший результат прогнозирования последствий взрыва диметилэвого эфира достигнут при использовании метода ME-TNO. Установлено, что для прогнозирования последствий взрывов в режиме дефлаграции лучше использовать ME-TNO-метод.

**Ключевые слова:** взрыв; детонация; дефлаграция; верификация; анализ; метод; VCE.

**DOI:** 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26

Сравнительный анализ и развитие методик прогнозирования взрывов газопаровоздушных смесей (Vapor Cloud Explosion — VCE) привлекают внимание многих исследователей из разных стран [1–53]. Настоящая работа продолжает цикл наших исследований по верификации методик на примерах реальных взрывов [50–53].

Ранее при рассмотрении взрыва паров растворителя на территории предприятий CAI и Arnel Manufacturing Facility, который произошел 22 ноября 2006 г. в г. Дэнверс (США), нами был проведен сравнительный анализ методов Дорофеева, РД 03-409–01 [54] (далее — РД) и BST (Baker–Strehlow–Tang). В результате был сделан вывод, что при известной ско-

Таблица 1. Классификация взрывоопасных ситуаций по TNO [55]

| Категория | Условия воспламенения | Загромождение пространства | Параллельное ограничение | Вид окружающего пространства | Класс |
|-----------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|-------|
| 1         | Благоприятные         | Сильное                    | Есть                     | Замкнутое                    | 7–10  |
| 2         | Благоприятные         | Сильное                    | Нет                      | Незамкнутое                  | 7–10  |
| 3         | Малоблагоприятные     | Сильное                    | Есть                     | Замкнутое                    | 5–7   |
| 4         | Благоприятные         | Слабое                     | Есть                     | Замкнутое                    | 5–7   |
| 5         | Благоприятные         | Слабое                     | Нет                      | Незамкнутое                  | 4–6   |
| 6         | Благоприятные         | Нет                        | Есть                     | Замкнутое                    | 4–6   |
| 7         | Малоблагоприятные     | Сильное                    | Нет                      | Незамкнутое                  | 4–5   |
| 8         | Благоприятные         | Нет                        | Нет                      | Замкнутое                    | 4–5   |
| 9         | Малоблагоприятные     | Слабое                     | Есть                     | Замкнутое                    | 3–5   |
| 10        | Малоблагоприятные     | Слабое                     | Нет                      | Незамкнутое                  | 2–3   |
| 11        | Малоблагоприятные     | Нет                        | Есть                     | Замкнутое                    | 1–2   |
| 12        | Малоблагоприятные     | Нет                        | Нет                      | Незамкнутое                  | 1     |

Таблица 2. Зоны повреждений на предприятиях CAI и Arnel Manufacturing Facility

| Данные визуальной оценки [50] |                        | Прогноз $\Delta P$ , кПа                                  |              |                                         |              |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|--------------|
| $R$ , ft (м)                  | $\Delta P$ , psi (кПа) | РД, Дорофеев [50]                                         | $\Delta$ , % | МЕ-TNO                                  | $\Delta$ , % |
| 365 (111,3)                   | 2,3 (15,9)             | 18,9 <sup>1</sup> ; 10,6 <sup>2</sup> ; 14,2 <sup>3</sup> | 19; 33; 11   | 16,67 <sup>4</sup> ; 14,87 <sup>5</sup> | 5; 6         |
| 581 (177,0)                   | 1,2 (8,3)              | 12,4 <sup>1</sup> ; 7,0 <sup>2</sup> ; 9,3 <sup>3</sup>   | 49; 16; 12   | 9,07 <sup>4</sup> ; 8,72 <sup>5</sup>   | 9; 5         |

Примечания:

1.  $\Delta$  — абсолютная ошибка.

2. Индексами обозначены данные: 1, 2, 3 — полученные при скорости распространения пламени соответственно 200, 150 и 173 м/с; 4 — для 7-го класса VCE по табл. 1; 5 — для 6-го класса VCE по табл. 1.

рости распространения пламени методы РД [54] и Дорофеева [12–14] позволяют прогнозировать последствия VCE с приемлемой точностью [50]. Однако на практике скорость распространения пламени часто попадает в категорию неизвестных величин, что сводит на нет преимущества методов РД и Дорофеева перед BST-методикой.

В настоящей работе с помощью мультиэнергетического подхода Нидерландской организации прикладных научных исследований (далее — МЕ-TNO) [55] проведено прогнозирование последствий взрыва в г. Дэнверс. Преимуществом метода МЕ-TNO является то, что тип взрывного превращения выбирается на основании данных табл. 1, и для этого не требуется знание точного значения скорости распространения пламени. Из табл. 1 видно, что категория или класс взрыва выбирается по четырем параметрам. Необходимо также отметить, что для адаптации к подходу РД [54] классификацию TNO по степени загромождения пространства (сильное — слабое — нет) следует трактовать, как “сильное — среднее — слабое (нет)” [52].

Условия взрыва паров растворителя на основе гептана в г. Дэнверс [50] попадают под 4-ю категорию взрыва. С помощью онлайн-калькулятора ком-

паний “GEXCON” [56] выполнен расчет избыточного давления  $\Delta P$  на расстоянии  $R$ , равном 365 и 581 ft (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что МЕ-TNO-метод дает более точный прогноз, чем методики РД и Дорофеева для реального взрыва паров растворителя в режиме дефлаграции.

28 июля 1948 г. на производственной площадке предприятия BASF в Людвигсхафене (Германия) под действием солнечной радиации произошла потеря целостности переполненной диметиловым эфиром<sup>1</sup> емкости, что привело к выходу наружу 30,4 т эфира с последующим взрывом газовой воздушной облака. В результате VCE 207 чел. погибли и 3808 чел. получили травмы различной степени тяжести [58]. В работе [59] по данным Маршалла [58] определены радиусы зон поражения (разрушения), которые взяты в качестве эталона (табл. 3). В статье [59] приведены также расчеты зон разрушения по методам федеральных норм и правил (далее — ФНП) [60],

<sup>1</sup> Структурная формула диметилового эфира —  $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$ . Температура кипения — минус 24,8 °C; теплота сгорания — 28,835 МДж/кг; температура вспышки — минус 80 °C; КПВ — 3,3–26,2 %; температура самовоспламенения — 350 °C [57].

Таблица 3. Прогноз радиуса зон разрушений и повреждений  $R$  для взрыва в Людвигсхафене

| Метод                                   | $R$ , м    |              |            |              | Примечание                           |
|-----------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------------------------------|
|                                         | 70 кПа     | $\Delta$ , % | 28 кПа     | $\Delta$ , % |                                      |
| Эталон                                  | ~160       | —            | ~310       | —            | По данным работы [59]                |
| ФНП                                     | 114        | 29           | 196        | 37           |                                      |
| ГОСТ Р 12.3.047–2012                    | 86         | 46           | 145        | 53           |                                      |
| РД 03-409–01*                           | <b>165</b> | <b>3</b>     | <b>280</b> | <b>10</b>    |                                      |
| ГОСТ Р 12.3.047–98                      | 85         | 47           | 145        | 53           |                                      |
| ГОСТ Р 12.3.047–2012 ( $V_r = 500$ м/с) | 63         | 61           | 106        | 66           | Онлайн-калькулятор компании “GEXCON” |
| ГОСТ Р 12.3.047–2012 ( $V_r = 300$ м/с) | 54         | 66           | 106        | 66           |                                      |
| РД 03-409–01 ( $V_r = 500$ м/с)         | 135        | 16           | 228        | 43           |                                      |
| РД 03-409–01 ( $V_r = 300$ м/с)         | 116        | 28           | 228        | 43           |                                      |
| МЕ-TNO (8–10-й класс VCE)               | 159        | 1            | 289        | 7            |                                      |
| BST2 (2,5D-конфигурация VCE)            | 124        | 23           | 261        | 16           | Режим детонации                      |
| Дорофеев                                | 143        | 11           | 275        | 11           |                                      |

\* Для сильно загроможденного пространства при  $V_r = 300 \div 500$  м/с.

ГОСТ Р 12.3.047–2012 (ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля) и РД [54] в сравнении с различными вариантами метода тротилового эквивалента [61–63]. В связи с тем что в работе [59] не приведены конкретные условия, при которых были выполнены прогнозы по методам ГОСТ Р 12.3.047–2012 и РД [54], они были повторены, а также осуществлено прогнозирование по методам МЕ-TNO [55], BST2 [64–66], Дорофеева [12–14] и ГОСТ Р 12.3.047–98 (ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля).

Сравнительный анализ данных табл. 3 показывает, что фактически в работе [59] при прогнозировании последствий VCE в Людвигсхафене использованы не методы ФНП [60] и ГОСТ Р 12.3.047–2012, а отмененные методики из ПБ 09-540–03 [67] и ГОСТ Р 12.3.047–98. Расчет по РД [54] выполнен некорректно. Результаты наших расчетов показывают, что отечественные методики, изложенные в

ГОСТ Р 12.3.047, РД [54] и ФНП<sup>2</sup>, плохо описывают последствия взрыва на предприятии BASF в Людвигсхафене. Наилучший результат прогнозирования радиусов зон разрушений и повреждений наблюдается при использовании метода МЕ-TNO. Метод Дорофеева в режиме детонации для исследуемого случая дает удовлетворительный прогноз последствий взрыва диметилового эфира.

### Выводы

1. В нашей стране применение различных методик по прогнозированию последствий VCE является неоправданным и нежелательным моментом.

2. На примере реальных взрывов установлено, что для режима дефлаграции лучшие прогнозы дает МЕ-TNO-метод.

<sup>2</sup> При известной массе горючего вещества в облаке газопаровоздушной смеси методики расчета последствий VCE в РД [54] и ФНП [60] совпадают.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cant R. S., Dawes W. N., Savill A. M. Advanced CFD and modeling of accidental explosions // Annual Review of Fluid Mechanics. — 2004. — Vol. 36. — P. 97–119. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.121948.
2. Clutter J. K. A reduced combustion model for vapor cloud explosions validated against full-scale data // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2001. — Vol. 14, No. 3. — P. 181–192. DOI: 10.1016/S0950-4230(00)00044-9.
3. Clutter J. K., Whitney M. G. Use of computational modeling to identify the cause of vapor cloud explosion incidents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2001. — Vol. 14, No. 5. — P. 337–347. DOI: 10.1016/S0950-4230(01)00022-5.
4. Lea C. J., Ledin H. S. A review of the state of the art in gas explosion modelling // Report HSL/2002/02. — Buxton : Health & Safety Laboratory, 2002. — 180 p.

5. Wolanski P., Kobiera A., Kindracki J. "Explosion pressure". The program for calculation of maximum pressure of explosion for chemical equilibrium conditions : report. — Warsaw : Warsaw University of Technology Institute of Heat Engineering, 2004. — 14 p.
6. Булхов Н. Н. Усовершенствование методов оценки условий возникновения и последствий взрывов на металлургических предприятиях : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 185 с.
7. Акинин Н. М. Методические основы прогнозирования и предотвращения взрывов легковоспламеняющихся и взрывчатых материалов на опасных производственных объектах металлургических и коксохимических предприятий : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2005. — 304 с.
8. 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.
9. Alonso F. D., Ferradás E. G., Pérez J. F. S., Aznar A. M., Gimeno J. R., Alonso J. M. Characteristic over-pressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO multi-energy model // *Journal of Hazardous Materials*. — 2006. — Vol. 137, No. 2. — P. 734–741. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.005.
10. Таубкин И. С., Фролов А. В. О методиках расчета параметров взрыва облаков газопаровоздушных смесей // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. — 2006. — № 2. — С. 35–45.
11. Trelat S. Impact de fortes explosions sur les bâtiments representatives d'une installation industrielle : these de doctorat. — Université d'Orléans, 2006. — 272 p.
12. Dorofeev S. B. A flame speed correlation for unconfined gaseous explosions // *Process Safety Progress*. — 2007. — Vol. 26, No. 2. — P. 140–149. DOI: 10.1002/prs.10176.
13. Dorofeev S. B. Blast effect of confined and unconfined explosions // *Proc. 20<sup>th</sup> ISSW "Shock waves"* / By ed. B. Sturtevant, J. Shepherd, H. Hornung. — Singapore : Scientific Publishing Co., 1996. — Vol. 1. — P. 77–86.
14. 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.
15. Alonso F. D., Ferradás E. G., Sánchez T. J. J., Aznar A. M., Gimeno J. R., Alonso J. M. Consequence analysis to determine the damage to humans from vapour cloud explosions using characteristic curves // *Journal of Hazardous Materials*. — 2008. — Vol. 150, No. 1. — P. 146–152. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.089.
16. Кочетов Н. М. О методиках оценки потенциальной опасности при проектировании технологических процессов // *Проблемы анализа риска*. — 2009. — Т. 6, № 2. — С. 64–69.
17. Van den Berg A. C. "BLAST": A compilation of codes for the numerical simulation of the gas dynamics of explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2009. — Vol. 22, No. 3. — P. 271–278. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.07.004.
18. Park D. J., Lee Y. S. A comparison on predictive models of gas explosions // *Korean Journal of Chemical Engineering*. — 2009. — Vol. 26, No. 2. — P. 313–323. DOI: 10.1007/s11814-009-0054-5.
19. Hansen O. R., Hinze P., Engel D., Davis S. Using computational fluid dynamics (CFD) for blast wave predictions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2010. — Vol. 23, No. 6. — P. 885–906. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.07.005.
20. Middha P. Development, use, and validation of the CFD tool FLACS for hydrogen safety studies : diss. doctor of philosophy. — University of Bergen (Norway), 2010. — 102 p.
21. Vågsæther K. Modelling of gas explosion : diss. doctor of philosophy. — Norwegian University of Science and Technology, 2010. — 178 p.
22. Sari A. Comparison of TNO multienergy and Baker–Strehlow–Tang models // *Process Safety Progress*. — 2011. — Vol. 30, No. 1. — P. 23–26. DOI: 10.1002/prs.10424.
23. Антипов В. Н., Скаков И. А. Анализ условий горения и взрыва топливно-воздушной смеси // *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*. — 2011. — № 3. — С. 58–61.
24. Антипов В. Н., Скаков И. А. Оценка физических эффектов при взрыве топливовоздушной смеси // *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*. — 2013. — № 2. — С. 39–42.
25. Ефремов К. В., Лисанов М. В., Софьин А. С., Самусева Е. А., Сумской С. И., Кириенко А. П. Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах // *Безопасность труда в промышленности*. — 2011. — № 9. — С. 70–77.
26. Пенелеев А. А. Численное моделирование внутреннего взрыва бытового газа и его воздействия на кирпичные жилые здания : дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2011. — 137 с.
27. Gelfand B. E., Silnikov M. V., Medvedev S. P., Khomik S. V. Thermo-gas dynamics of hydrogen combustion and explosion. — N. Y. : Springer, 2012. — 324 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25352-2.

28. Бузаев Е. В. Разработка методов прогнозирования параметров взрывоопасных зон при аварийных выбросах горючих веществ : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 124 с.
29. Глухов А. В. Совершенствование расчетных методов оценки пожаровзрывоопасности нефтегазовых производственных объектов : дис. ... канд. техн. наук. — Оренбург, 2011. — 148 с.
30. Assael M. J., Kakosimos K. E. Fires, explosions, and toxic gas dispersions. Effects calculation and risk analysis. — Boca Raton : CRC Press, 2010. — 345 p.
31. Кривченко А. Л., Кривченко Д. А., Чуркин О. Ю. О принципах расчета параметров детонации в конденсированных и газовых системах // Наука и современность. — 2010. — № 1-2. — С. 166–171.
32. CCPS. Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards. — N. Y. : J. Wiley & Sons, 2010. — 456 p.
33. Салеев Е. П. Расчетный метод оценки границ зон разрушений при взрыве газопаровоздушных смесей // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2011. — № 3. — С. 17–20.
34. Ключин А. В., Егорова Ю. А., Горохова А. Г. Сравнительный анализ методов прогнозирования масштабов аварий с объемными взрывами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2013. — Т. 2, № 9(13). — С. 170–176.
35. Мазур А. С., Бушнев Г. В., Янковский И. Г. О проблемах определения параметров аварийных взрывов газопаровоздушных смесей и их воздействия на людей, здания и сооружения // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2014. — № 2(30). — С. 32–40.
36. Васьков Р. Е., Богач В. В., Кочетов Н. М. Оценка энергии ударной волны взрыва топливно-воздушной смеси // Вестник Казанского технологического университета. — 2015. — Т. 18, № 2. — С. 420–421.
37. Васьков Р. Е., Кочетов Н. М. Надежность методик прогнозирования последствий взрыва топливно-воздушной смеси на опасном производственном объекте // Проблемы анализа риска. — 2014. — Т. 11, № 6. — С. 60–71.
38. Ramírez-Marengo C., Diaz-Ovalle C., Vázquez-Román R., Mannan M. S. A stochastic approach for risk analysis in vapor cloud explosion // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2015. — Vol. 35. — P. 249–256. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.006.
39. Li J., Abdel-Jawad M., Ma G. New correlation for vapor cloud explosion overpressure calculation at congested configurations // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2014. — Vol. 31. — P. 16–25. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.05.013.
40. Агапова Е. А., Дегтярев Д. В., Лисанов М. В., Крюков А. С., Кульберг С. Б., Сумской С. И. Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 9. — С. 71–78.
41. Орищенко И. В., Грачева Н. Н., Руденко Н. Б., Литвинов В. Н., Петренко Н. В. Компьютерная модель оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2015. — № 106. — С. 301–312. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/02/pdf/019.pdf> (дата обращения: 18.02.2016).
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.

49. 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.
50. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2 // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 3. — С. 6–12.
51. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Полищук Е. Ю. Сравнительный анализ методик прогнозирования ВСЕ на примере взрыва во Фликсборо // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 5. — С. 24–35.
52. 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.
53. Алексеев С. Г., Гурьев Е. С., Барбин Н. М., Животинская Л. О. Верификация методик прогнозирования последствий на примере реального взрыва изопентана // Техносферная безопасность. — 2015. — № 2(7). — С. 22–23. URL: <http://uigps.ru/sites/default/files/jurnal/stat%20PB%207/3.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).
54. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 № 25. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=334178> (дата обращения: 10.02.2016).
55. Van den Bosch C. J. H., Weterings R. A. P. M. (eds.). CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects. “Yellow Book”. — Hague : Gevaarlijke Stoffen, 2005. — 870 p.
56. Сайт компании GEXCON. Vapour cloud explosion blasts — Multi-Energy method. URL: <http://www.gexcon.com/tools/MEMethod> (дата обращения: 19.02.2016).
57. База данных DIPPR 801. URL: <http://dippr.byu.edu> (дата обращения: 19.02.2016).
58. Маршалл В. Основные опасности химических производств. — М. : Мир, 1989. — 672 с.
59. Бызов А. П., Короткий И. В. Оценка последствий взрывов топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах // Научный форум с международным участием “Неделя науки СПбПУ” : материалы научно-практической конференции. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2015. — С. 165–169.
60. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств” : утв. приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=145465> (дата обращения: 10.02.2016).
61. Козлитин А. М. Развитие теории и методов оценки рисков для обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса : дис. ... д-ра техн. наук. — Саратов, 2006. — 395 с.
62. Бирбраер А. Н., Родлер А. Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. — 594 с.
63. Демиденко Г. П., Кузьменко Е. П., Орлов П. П., Пролыгин В. А., Сидоренко Н. А. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения : справочник. — Київ : Выща Шк., 1989. — 287 с.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. ПБ 09-540-03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств : утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 05.05.2003 № 29. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=42332> (дата обращения: 11.02.2016).

Материал поступил в редакцию 25 февраля 2016 г.

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

## COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNIQUES OF FORECASTING VCE ON EXAMPLE OF REAL EXPLOSIONS

**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 (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: asipl@ugps.perm.ru)

**LITVINOV V. N.**, Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Information Technologies and Control Systems of Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Lenina St., 21, Zernograd, 347740, Russian Federation; e-mail address: LitvinovVN@rambler.ru)

**GRACHEVA N. N.**, Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of Information Technologies and Control Systems of Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Lenina St., 21, Zernograd, 347740, Russian Federation; e-mail address: grann72@mail.ru)

**RUDEENKO N. B.**, Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of Information Technologies and Control Systems of Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Lenina St., 21, Zernograd, 347740, Russian Federation; e-mail address: nelli-rud@yandex.ru)

**ORISHCHENKO I. V.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer of Department of Information Technologies and Control Systems of Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Lenina St., 21, Zernograd, 347740, Russian Federation; e-mail address: Orishenkolrina@mail.ru)

**BARBIN N. M.**, Doctor of Technical Sciences, Head of Chemistry Department, Ural State Agrarian University (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)

### ABSTRACT

The comparative analysis and development of forecasting techniques of vapor cloud explosions (VCE) are attracted attention of many researchers from the different countries. The present work prolongs a cycle of the author's investigation on verification of procedures on examples of real explosions. It is earlier positioned that the RD 03-409-01 and Dorofeev's methods are able to predict consequences VCE with comprehensible accuracy, if the flame speed is known. However in practice flame propagation it is often not known that it will impede practical application of the RD 03-409-01 and Dorofeev's methods.

In the present research it is shown that the ME-TNO method is predicted the deflagration VCE, which has place on November 22, 2006 in Denvers (USA). Advantage of the ME-TNO method is that it does not demand knowledge of the specific value of a flame speed. In the present research it is shown that the ME-TNO method is predicted the real deflagration VCE better the RD 03-409-01 and Dorofeev's methods.

Under the influence of a sunshine loss of integrity of container with dimethyl ether with the subsequent VCE took place on July 28, 1948 on an industrial territory of BASF in Ludwigshafen (Germany). There were lost 207 persons and 3808 persons have got traumas of various gravity by action of this VCE. This explosion is explored by methods of Federal Norms and Rules, GOST R 12.3.047-98, GOST R 12.3.047-2012, RD 03-409-01, ME-TNO, BST2 (Baker-Strehlow-Tang) and Dorofeev. There are found that the Russian and BST2 methods badly predict explosion consequences

at the BASF in Ludwigshafen. The best result of forecasting of consequences of explosion of dimethyl ether are reached at use of the ME-TNO method. For forecasting of consequences of deflagration VCE it is better to use the ME-TNO method.

**Keywords:** explosion; detonation; deflagration; verification; analysis; method; VCE.

## REFERENCES

1. Cant R. S., Dawes W. N., Savill A. M. Advanced CFD and modeling of accidental explosions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 36, pp. 97–119. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.121948.
2. Clutter J. K. A reduced combustion model for vapor cloud explosions validated against full-scale data. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, vol. 14, no. 3, pp. 181–192. DOI: 10.1016/S0950-4230(00)00044-9.
3. Clutter J. K., Whitney M. G. Use of computational modeling to identify the cause of vapor cloud explosion incidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, vol. 14, no. 5, pp. 337–347. DOI: 10.1016/S0950-4230(01)00022-5.
4. Lea C. J., Ledin H. S. *A review of the state of the art in gas explosion modelling. Report HSL/2002/02*. Buxton, Health & Safety Laboratory, 2002. 180 p.
5. Wolanski P., Kobiera A., Kindracki J. "Explosion pressure". *The program for calculation of maximum pressure of explosion for chemical equilibrium conditions. Report*. Warsaw, Warsaw University of Technology Institute of Heat Engineering, 2004. 14 p.
6. Bulkhov N. N. *Improvement of methods of an estimation of conditions of occurrence and consequences of explosions at the metallurgical plants. Dr. tech. sci. diss.* Moscow, 2004. 185 p. (in Russian).
7. Akinin N. M. *Methodical basis of forecasting and prevention of explosions of inflammable and explosive materials on dangerous industrial objects of the metallurgical and coke-chemical plants. Dr. tech. sci. diss.* Moscow, 2005. 304 p. (in Russian).
8. 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.
9. Alonso F. D., Ferradás E. G., Pérez J. F. S., Aznar A. M., Gimeno J. R., Alonso J. M. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO multi-energy model. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 137, no. 2, pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.005.
10. Taubkin I. S., Frolov A. V. About methods of calculation of explosion indices for VCEs. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy (Problems of Safety and Emergency Situations)*, 2006, no. 2, pp. 35–45 (in Russian).
11. Trelat S. *Impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatives d'une installation industrielle. These de doctorat*. Université d'Orléans, 2006. 272 p.
12. 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.
13. Dorofeev S. B. Blast effect of confined and unconfined explosions. *Proc. 20<sup>th</sup> ISSW "Shock waves"* (Eds.: B. Sturtevant, J. Shepherd, and H. Hornung). Singapore, Scientific Publishing Co., 1996, vol. 1, pp. 77–86.
14. 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.
15. Alonso F. D., Ferradás E. G., Sánchez T. J. J., Aznar A. M., Gimeno J. R., Alonso J. M. Consequence analysis to determine the damage to humans from vapour cloud explosions using characteristic curves. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 150, no. 1, pp. 146–152. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.089.
16. Kochetov N. M. About methods for hazard assessment while designing technological processes. *Problemy analiza riska (Issues of Risk Analysis)*, 2009, vol. 6, no. 2, pp. 64–69 (in Russian).
17. Van den Berg A. C. "BLAST": A compilation of codes for the numerical simulation of the gas dynamics of explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, vol. 22, no. 3, pp. 271–278. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.07.004.
18. Park D. J., Lee Y. S. A comparison on predictive models of gas explosions. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2009, vol. 26, no. 2, pp. 313–323. DOI: 10.1007/s11814-009-0054-5.
19. Hansen O. R., Hinze P., Engel D., Davis S. Using computational fluid dynamics (CFD) for blast wave predictions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, vol. 23, no. 6, pp. 885–906. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.07.005.

20. Middha P. *Development, use, and validation of the CFD tool FLACS for hydrogen safety studies*. Dr. Ph. diss. University of Bergen (Norway), 2010. 102 p.
21. Vågsæther K. *Modelling of gas explosion*. Dr. Ph. diss. Norwegian University of Science and Technology, 2010. 178 p.
22. Sari A. Comparison of TNO multienergy and Baker–Strehlow–Tang models. *Process Safety Progress*, 2011, vol. 30, no. 1, pp. 23–26. DOI: 10.1002/prs.10424.
23. Antipyev V. N., Skakov I. A. Analysis of the fuel-air mixture burning and explosion. *Upravleniye kachestvom v neftegazovom komplekse (Quality Management in Oil-and-Gas Complex)*, 2011, no. 3, pp. 58–61 (in Russian).
24. Antipyev V. N., Skakov I. A. Estimation of physical effects at explosion of fuel-air mixture. *Upravleniye kachestvom v neftegazovom komplekse (Quality Management in Oil-and-Gas Complex)*, 2013, no. 2, pp. 39–42 (in Russian).
25. Efremov K. V., Lisanov M. V., Sofyin A. S., Samuseva Ye. A., Sumskey S. I., Kirienko A. P. Calculation of buildings and structures destruction zones resulted from explosions of fuel-air mixtures at hazardous production facilities. *Bezopasnost truda v promyshlennosti (Industrial Safety Labour)*, 2011, no. 9, pp. 70–77 (in Russian).
26. Pepelyaev A. A. *Numerical modelling of confined explosion of the household gas and its action on brick residential buildings*. Dr. tech. sci. diss. Perm, 2011. 137 p. (in Russian).
27. Gelfand B. E., Silnikov M. V., Medvedev S. P., Khomik S. V. *Thermo-gas dynamics of hydrogen combustion and explosion*. N. Y., Springer, 2012. 324 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25352-2.
28. Buzaev E. V. *Making of methods of forecasting of parameters of explosive areas at the emergency exhausts of combustible substances*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, 2015. 124 p. (in Russian).
29. Glukhov A. V. *Perfection of calculation methods of an estimation of fire and explosive hazard of oil and gas industrial objects*. Dr. tech. sci. diss. Orenburg, 2011. 148 p. (in Russian).
30. Assael M. J., Kakosimos K. E. *Fires, explosions, and toxic gas dispersions. Effects calculation and risk analysis*. Boca Raton, CRC Press, 2010. 345 p.
31. Krivchenko A. L., Krivchenko D. A., Churkin O. Yu. About principles of calculation of parameters of a detonation in the condensed and gas systems. *Nauka i sovremennost (Science and Modernity)*, 2010, no. 1-2, pp. 166–171 (in Russian).
32. CCPS. *Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards*. N. Y., J. Wiley & Sons, 2010. 456 p.
33. Saleev E. P. Rated method of an assessment of borders of zones of destructions at explosion gas-steam-air mixtures. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya (Fire and Emergencies: Prevention, Elimination)*, 2011, no. 3, pp. 17–20 (in Russian).
34. Klyuzhin A. V., Egorova Yu. A., Gorokhova A. G. Forecasting methods comparative analysis regarding the scale of extentional explosion breakdowns. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus (XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus)*, 2013, vol. 2, no. 9(13), pp. 170–176 (in Russian).
35. Mazur A. S., Bushnev G. V., Yankovskiy I. G. About problems of determination of parameters of emergency explosions of gazoparovozdushnyh of mixes and their impacts on people, buildings and constructions. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere (Problems of Technosphere Risk Management)*, 2014, no. 2(30), pp. 32–40 (in Russian).
36. Vaskov R. E., Bogach V. V., Kochetov N. M. Estimation of energy of a blast wave of explosion of a fuel-air mixture. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Bulletin of the Kazan Technological University)*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 420–421 (in Russian).
37. Vaskov R. E., Kochetov N. M. Reliability prediction techniques consequences of the explosion of the fuel-air mixture at hazardous production facilities. *Problemy analiza riska (Issues of Risk Analysis)*, 2014, vol. 11, no. 6, pp. 60–71 (in Russian).
38. Ramírez-Marengo C., Diaz-Ovalle C., Vázquez-Román R., Mannan M. S. A stochastic approach for risk analysis in vapor cloud explosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, vol. 35, pp. 249–256. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.09.006.
39. Li J., Abdel-Jawad M., Ma G. New correlation for vapor cloud explosion overpressure calculation at congested configurations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, vol. 31, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.05.013.
40. Agapova E. A., Degtyarev D. V., Lisanov M. V., Kryukov A. S., Kulberg S. B., Sumskey S. I. Comparative analysis of the russian and foreign methods and computer programs on modeling emergency releases and risk assessment. *Bezopasnost truda v promyshlennosti (Industrial Safety Labour)*, 2015, no. 9, pp. 71–78 (in Russian).

41. Orishchenko I. V., Gracheva N. N., Rudenko N. B., Litvinov V. N., Petrenko N. V. A computer model of the consequences of air-fuel mixture emergency explosions. *Nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Scientific Journal of Kuban State Agrarian University)*, 2015, no. 106, pp. 301–312 (in Russian). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/02/pdf/019.pdf> (Accessed 18 February 2016).
42. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. I. RB G-05-039–96. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 37–47 (in Russian).
43. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. II. RD 03-409–01. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 21–27 (in Russian).
44. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. III. SP 12.13130.2009. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 33–38 (in Russian).
45. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. IV. GOST R 12.3.047–98. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 6, pp. 34–37 (in Russian).
46. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. V. PB 09-540–03. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 32–35 (in Russian).
47. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. VI. TNO methods (part 1). *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 22–29 (in Russian).
48. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. VII. BST methods. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 23–30 (in Russian).
49. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Guryev E. S., Barbin N. M. 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 (in Russian).
50. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev E. S. Analysis 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 — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 6–12 (in Russian).
51. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Polishchuk E. Yu. Comparative analysis of techniques of forecasting VCE on an explosion example in Flixborough. *Pozharovryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 5, pp. 24–35 (in Russian).
52. Alexeev S. G., Guryev E. S., Barbin N. M. About comparison of methods of forecasting of consequences of vapor cloud explosions again]. *Problemy analiza riska (Issues of Risk Analysis)*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 56–70 (in Russian).
53. Alexeev S. G., Guryev E. S., Barbin N. M., Zhivotinskaya L. O. Verification of techniques of forecasting of consequences on the example of real explosion of isopentane. *Tekhnosferная bezopasnost (Technosphere Safety)*, 2015, no. 2(7), pp. 22–23 (in Russian). Available at: <http://uigps.ru/content/nauchnyy-zhurnal/> (Accessed 18 February 2016).
54. *Management Document 03-409–01. The prediction method for analysis of VCE damages* (in Russian). Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=334178> (Accessed 10 February 2016).
55. Van den Bosch C. J. H., Weterings R. A. P. M. (eds.). *CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects*. “Yellow Book”. Hague, Gevaarlijke Stoffen, 2005. 870 p.
56. *GEXCON. Vapour cloud explosion blasts — Multi-Energy method*. Available at: <http://www.gexcon.com/tools/MEMethod> (accessed 19 February 2016).
57. *DIPPR 801*. Available at: <http://dippr.byu.edu> (Accessed 19 February 2016).
58. Marshall V. C. *Major chemical hazards*. N. Y., J. Wiley & Sons, 1987. 1033 p. (Russ. ed.: Marshall V. Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv. Moscow, Mir Publ., 1989. 672 p.).
59. Byzov A. P., Korotkiy I. V. Estimation of consequences of explosions of fuel-air mixtures on dangerous industrial objects. In: *Proceedings of Scientific Forum with the International Participation “Week of Science of St. Petersburg Polytechnic University”*. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, pp. 165–169 (in Russian).

60. *Federal norms and rules in the field of industrial safety "General explosion safety rules for fire and explosive hazard chemical, petrochemical and oil refining productions"* (in Russian). Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=145465> (Accessed 10 February 2016).
61. Kozlitin A. M. *Development of the theory and methods of an estimation of hazards for maintenance of industrial safety of objects of the oil and gas complex. Dr. tech. sci. diss.* Saratov, 2006. 395 p. (in Russian).
62. Birbraer A. N., Rodler A. Yu. *Extreme actions on constructions.* St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2009. 594 p. (in Russian).
63. Demidenko G. P., Kuzmenko E. P., Orlov P. P., Prolygin V. A., Sidorenko N. A. *Protection of objects of a national economy against weapons of mass destruction. Manual.* Kiev, Vysshaya shkola, 1989. 287 p. (in Russian).
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. Rules of Safety 09-540–03. Common explosion safety rules for fire, explosive, hazard, chemical, petrochemical and oil refining factories (in Russian). Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=42332> (Accessed 11 February 2016).

**For citation:** Alexeev S. G., Avdeev A. S., Litvinov V. N., Gracheva N. N., Rudenko N. B., Orishchenko I. V., Barbin N. M. Comparative analysis of techniques of forecasting VCE on example of real explosions. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 7, pp. 16–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26.



## Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



### Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 40 с. : ил.

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: [info@fire-smi.ru](mailto:info@fire-smi.ru)