

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. Ю. ПОЛИЩУК, канд. техн. наук, начальник кафедры расследования пожаров Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: еруур@ya.ru)

УДК 614.83:661.715.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ VCE НА ПРИМЕРЕ ВЗРЫВА ВО ФЛИКСБОРО

На примере аварии, происшедшей 1 июня 1976 г. на предприятии “Нипро” в г. Фликсборо (Великобритания), на основании математической обработки данных Сади установлено, что зависимость избыточного давления взрыва $P_{взр}$ от расстояния R_1 описывается уравнением $P_{взр} = 94970(R_1)^{-1,526}$ с коэффициентом корреляции 0,990. Показано, что данные Сади можно использовать в качестве эталона при верификации методик прогнозирования последствий взрывов газопаровоздушных смесей. На основании сравнительного анализа отечественных и зарубежных методов установлено, что последствия реального взрыва во Фликсборо лучше всего описываются TNT-методом из РД 03-409–01 и уравнением Дорофеева для режима детонации.

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

В предыдущих работах [1–9] нами анализировались возможности отечественных и зарубежных расчетных методов на примерах гипотетической аварийной ситуации, связанной с разлитием авиационного топлива марки РТ, и реального промышленного взрыва в г. Дэнверс (Danvers) в США.

В настоящей статье продолжено рассмотрение возможностей существующих методик оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере промышленного взрыва циклогексана, происшедшего 1 июня 1976 г. на предприятии “Нипро” (Nupro) в г. Фликсборо (Flixborough) в Великобритании, в результате которого погибло 28 и пострадало 89 чел. Разрушения различной степени (от полного до частичного) получили около 2 тыс. промышленных и гражданских зданий, а также технологическое оборудование компании “Нипро” (рис. 1). Данный случай, вошедший в первую десятку самых крупных промышленных аварий XX столетия, был подвергнут всесторонним экспертизам. Ему посвя-

щены многочисленные исследования и описания [10–39]. Несмотря на это остались неисследованными многие вопросы, касающиеся различных аспектов промышленной аварии на предприятии “Нипро”. В частности, не были точно установлены: химический и физический состав, а также масса испарившегося вещества¹, временной промежуток между разрушением байпаса и взрывом газопаровоздушной смеси, или VCE (vapor cloud explosion)². В связи с этим прогнозы TNT-эквивалента взрыва во Фликсборо колеблются от 15 до 55 т [10–28].

Рядом исследователей составлены таблицы, в которых приведены данные по избыточному давлению

¹ Установлено, что основным компонентом смеси был циклогексан (около 94 %), поэтому все ранее выполненные расчеты сделаны по этому веществу.

² Для обозначения взрыва газопаровоздушной смеси на открытом (незамкнутом) пространстве используется аббревиатура UVCE (unconfined vapor cloud explosion).



Рис. 1. Пожар после взрыва на предприятии “Нипро” во Фликсборо (Великобритания) 01.06.76 г. [11, 40, 41]

взрыва в зависимости от расстояния от центра взрыва R_1 для промышленной аварии во Фликсборо, полученные на основании анализа картины фактических разрушений [10, 15]. В. Маршаллом (Marshall) [10] отдано предпочтение данным Сади (Sadee), которые приведены в таблице. Путем обработки этих данных с помощью Microsoft Excel 2013 с исключением четырех точек из 21 (см. таблицу) выведена формула (1), которая с приемлемой точностью описывает зависимость избыточного давления взрыва $P_{\text{взр}}$ (кПа) от расстояния R_1 (м) для рассматриваемой аварии. Таким образом, получен дополнительный аргумент в пользу возможности использования данных таблицы в качестве эталона для сравнения методик прогнозирования VCE:

$$P_{\text{взр}} = 94970(R_1)^{-1,526} \quad (r = 0,990), \quad (1)$$

где r — коэффициент корреляции.

Зависимость избыточного давления взрыва от расстояния по данным Сади [10]

R_1 , м	$P_{\text{взр}}$, кПа	R_1 , м	$P_{\text{взр}}$, кПа	R_1 , м	$P_{\text{взр}}$, кПа
120	50	230	24	700	3,5
125	60	290	18,5	825	2,75
130	50	290	18,5	885	4,5
135	60	335	14	945	1,75
160	35	350	14	1190	2,5
220	27,5	400	12	1340	1,75
230	18,5	535	11	1345	1,75

Примечание. Выделены значения, которые не учитывались при выводе уравнения (1).

Масса вышедшего наружу циклогексана в результате разгерметизации байпаса неизвестна. В литературе приводятся данные, охватывающие широкий диапазон значений, — от 30 до 125 т [10, 13–15, 23, 27, 34, 37]. Однако только в книге Маршалла [10] приведен пример расчета, согласно которому максимальный выход циклогексана составляет 125 т (суммарное содержание продукта в пяти резервуарах и технологическом оборудовании выше уровня каскада реакторов (рис. 2)). Ранее в [10, 28] при определении доли испарившегося циклогексана F по уравнениям (2) и (3) были получены несовместимые результаты:

$$F = \Delta T \frac{c_{\text{р.т}}}{H_{\text{исп.т}}} = 0,35; \quad (2)$$

$$F = 1 - \exp\left(-\Delta T \frac{c_{\text{р.т}}}{H_{\text{исп.т}}}\right) = 0,17, \quad (3)$$

где ΔT — разница между рабочей температурой жидкости и температурой ее кипения, К;

$c_{\text{р.т}}$ — удельная теплоемкость парообразования, кДж/(кг·К);

$H_{\text{исп.т}}$ — удельная теплота парообразования, кДж/кг;

$\exp$ — основание натурального логарифма.

При повторении расчетов по определению F по формулам (2) и (3) с использованием базы данных DIPPR 801 [42] установлено, что авторами работ [10, 28] использованы некорректные исходные данные для циклогексана. Уточненные значения F , рассчитанные по уравнениям (2) и (3), составляют 0,303 и 0,261 соответственно. Таким образом, в промышленной аварии во Фликсборо верхняя граница теоретически возможной массы циклогексана в паровом облаке не превышает 37,9 т ($0,303 \times 125 \approx 37,9$ т).

Техническими экспертами сделан вывод, что источником зажигания послужило технологическое оборудование цеха по производству водорода (рис. 3). Это обстоятельство позволяет графическим способом по плану предприятия “Нипро” оценить радиус

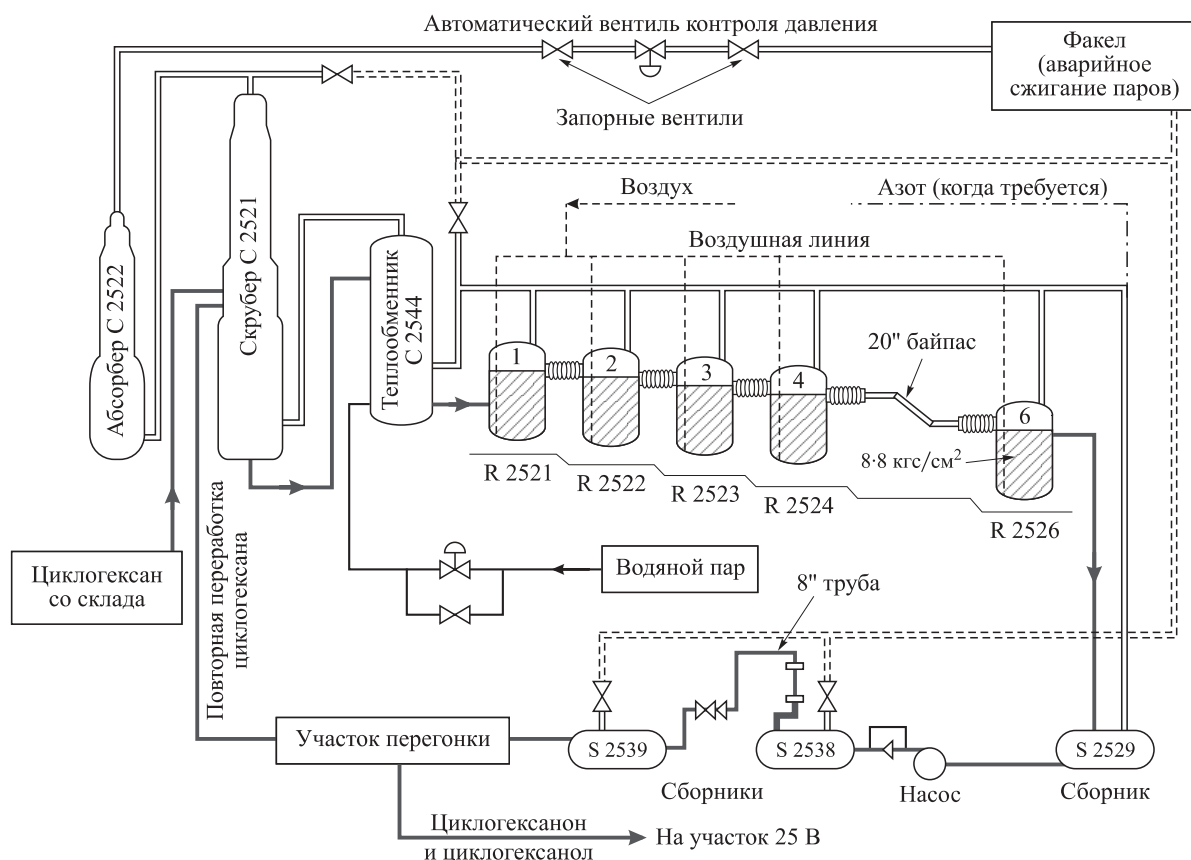


Рис. 2. Технологическая схема окисления циклогексана на момент аварии [11]

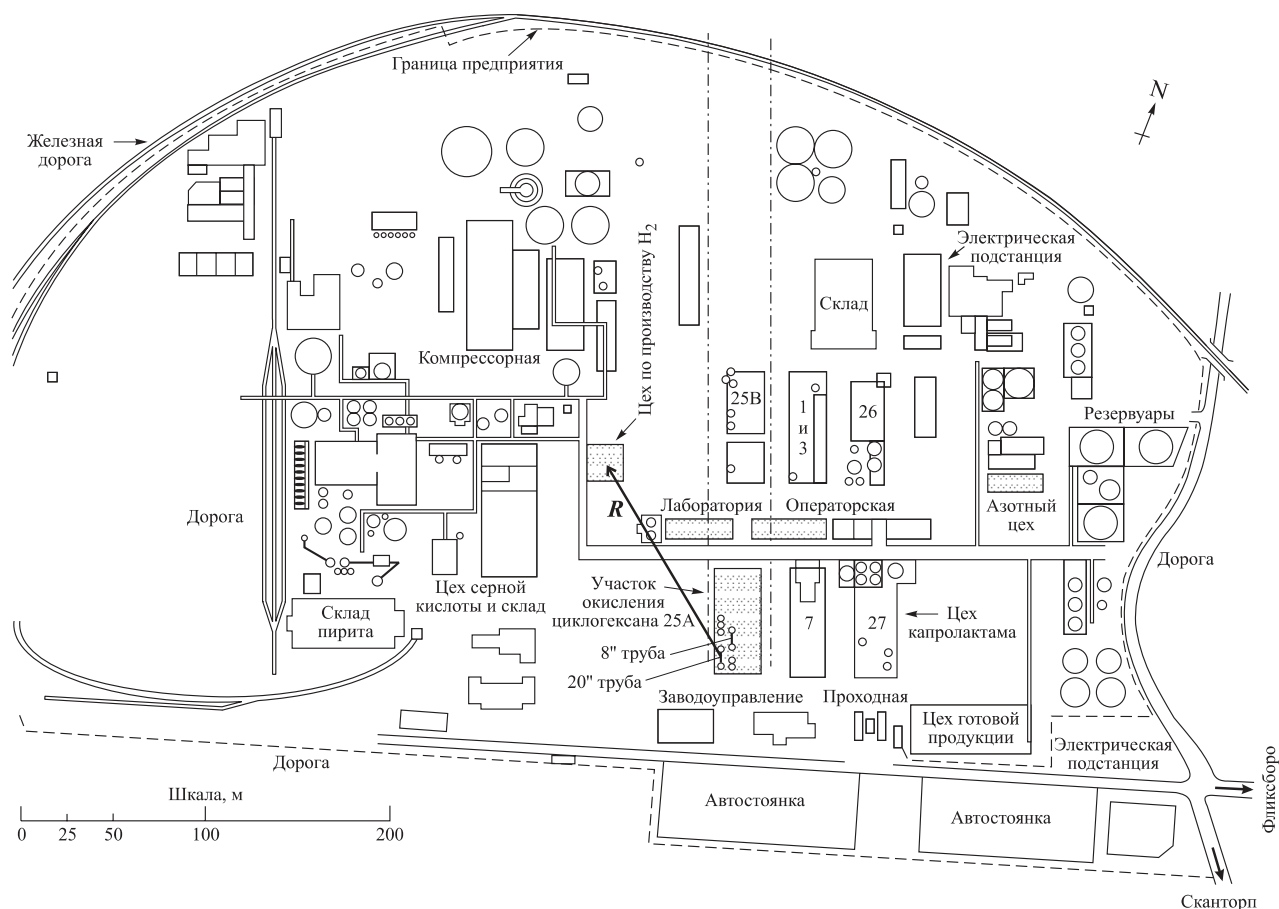


Рис. 3. План завода “Нипро” [11]

взрывопожароопасной паровоздушной смеси, который составляет примерно 109 м. Полученный результат совпадает с выводом о среднем радиусе парового облака (110 м), сделанным в отчете “Health & Safety Commission” [13].

Поскольку реальная масса и ее доля, которая приняла участие в VCE, неизвестны, сравнение разных методик выполнено при различных количествах горючего вещества, но с учетом верхнего порога массы циклогексана и радиуса облака паровоздушной смеси R (м). При этом проверена гипотеза, что этот параметр связан с массой горючего вещества m (т) уравнением (4)³:

$$R = 30 \sqrt[3]{m}. \quad (4)$$

При этом считается, что газопаровоздушное облако имеет форму сферического сегмента с отношением радиуса к высоте 5:1 [13, 43]. В результате уточнения уравнения (4) получено новое соотношение (4а), которое согласуется с ранее сделанными выводами о массе паров 37,9 т и радиусе паровоздушного облака циклогексана 109 м:

$$R = 32,5 \sqrt[3]{m}. \quad (4a)$$

Объем паровоздушного облака V (м³) при температуре 353 К,⁴ в котором содержится 37,9 т циклогексана при стехиометрической концентрации $C_{стх}$ или при концентрационных пределах воспламенения C_n и C_v , легко вычисляется через соответствующие массовые концентрации. Далее решением кубического уравнения (5) найдена высота облака h (м) для этих концентраций:

$$1/3 h^3 - Rh^2 + V/\pi = 0. \quad (5)$$

Таким образом, для нашего случая отношение R/h составит 2,48; 1,82 и 4,75 для $C_{стх}$, C_n и C_v соответственно. Следовательно, высказанная ранее гипотеза о том, что $R/h = 5$ [13, 43], не находит своего подтверждения.

Метод РБ Г-05-039-96

Методика РБ Г-05-039-96 допускает прогнозирование VCE как в режиме детонации, так и в режиме дефлаграции. При этом нормированного подхода для выбора режима VCE данный метод не предлагает [45], поэтому нами рассмотрены оба варианта.

Режим детонации

В руководстве содержится два подхода для расчета последствий VCE. Первый подход основан на

уравнении (4) и используется для экспресс-оценок [45]. Результаты прогноза по формуле (6) в сравнении с данными таблицы представлены на рис. 4:

$$P_{взр} = P_0 (0,8m_{пр} + 2,2(m_{пр})^2 + 1,2(m_{пр})^3), \quad (6)$$

где P_0 — атмосферное давление, кПа; $P_0 = 101$ кПа;
 $m_{пр}$ — приведенная масса;

$$m_{пр} = 0,0605 \frac{\sqrt[3]{q_m m_r}}{R_1}, \quad (5)$$

q_m — удельная энергия взрыва стехиометрической смеси газа (пара) с воздухом, кДж/кг;
 $q_m = 2797$ кДж/кг [45];

m_r — масса газа, кг.

При втором подходе методики РБ [45] избыточное давление взрыва $P_{дет}$ (кПа) в пределах паровоздушного облака вычисляется по уравнению (7) и составляет 1692,8 кПа, а за его пределами — по формулам (8)–(10):

$$P_{дет} = 2,586(\gamma - 1)q_m - P_0; \quad (7)$$

$$P_{взр} = 1,227 \cdot 10^{-6} / (R_{пр})^{4,68} + 0,49, \quad (8)^6$$

$$0,05 < R_{пр} \leq 0,068;$$

$$P_{взр} = 4,156 / (R_{пр})^{1,7}, \quad (9)$$

$$0,068 < R_{пр} \leq 0,31;$$

$$P_{взр} = 4,96 / R_{пр} + 0,974 / (R_{пр})^2 + 0,146 / (R_{пр})^3, \quad (10)$$

$$R_{пр} > 0,31,$$

где γ — показатель адиабаты исходной смеси;

$\gamma = 1,248$ [44];

$R_{пр}$ — приведенное расстояние от центра взрыва (парового облака); $R_{пр} = R_1(2\eta q_v V)^{-1/3}$;

$\eta = 1 - (2P_0/P_{дет})^{(\gamma-1)/\gamma}$;

q_v — удельная (объемная) энергия взрыва стехиометрической смеси газа с воздухом, кДж/м³;

$q_v = 3748$ кДж/м³ [45];

V — объем полусферического паровоздушного облака при $C_{стх}$, м³; $V = 42344,8$ м³ (рассчитан через массовую стехиометрическую концентрацию).

Результаты вычислений по формулам (9) и (10) для 4,5 т циклогексана приведены на рис. 4, из которого видно, что экспресс-метод дает явно завышенное количество горючего вещества, участвующего во взрыве. Необходимо отметить, что радиус полусферического паровоздушного облака для 4,5 т циклогексана при температуре 353 К равен 31,88 м, а не 110 м. Однако ветер был юго-восточный, т. е. в сторону участка “Hydrogen plant” [13], что обычно приводит к дрейфу облака, а в нашем случае к трансформации его полусферической формы в си-

³ В отечественной литературе подобное уравнение $R_0 = (30 \div 50) \sqrt[3]{m}$ используется для определения безопасного расстояния для людей при режиме UVCE для углеводородов [44].

⁴ Зарубежными экспертами температура парового облака принимается равной температуре кипения циклогексана [11].

⁵ В руководстве безопасности [45] данное уравнение приведено с опечаткой (параметр R_1 внесен в кубический корень).

⁶ Ранее уже отмечалось, что уравнение (8) дает неправдоподобные прогнозы [1]. Возможно, это связано с ошибочным значением множителя (10^{-6} вместо 10^{-3}).

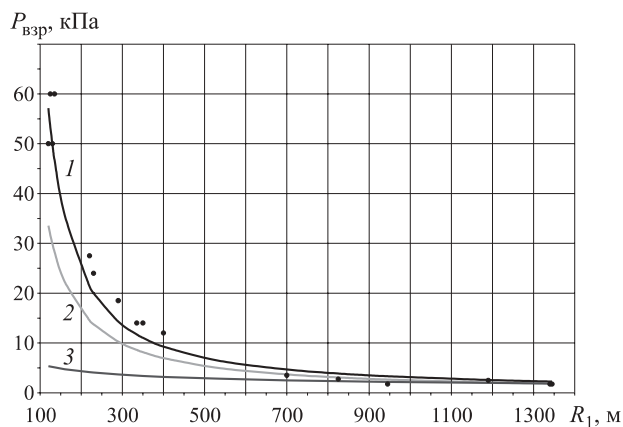


Рис. 4. Результаты прогнозирования по методам РБ Г-05-039–96: точки — данные таблицы; 1 — метод детонации для 4,5 т; 2 — экспресс-метод для 37,9 т; 3 — метод дефлаграции при $w/a_0 = 0,6$

гарообразную, так как на момент взрыва выход капель и паров циклогексана продолжался. Если предположить, что вытягивание облака равно его дрейфу, то по прогнозу РБ Г-05-039–96 оно составит 76–102 м. Таким образом, предположение о нахождении непосредственного источника зажигания в районе технологического участка по производству водорода не исключается.

Режим дефлаграции

По идеологии РБ Г-05-039–96 в режиме дефлаграции топливовоздушной смеси скорость распространения фронта пламени⁷ w (м/с) меньше скорости звука a_0 . Зависимость избыточного давления взрыва от расстояния (9) для этого режима VCE работает при диапазоне w от 68 до 204 м/с [45]. На рис. 4 представлены результаты прогноза избыточного давления по уравнению (11):

$$P_{\text{взр}} = \frac{P_{\text{max}}}{1 + G (R_1/R_{nr} - 1)^H}, \quad (11)$$

где P_{max} — максимальное избыточное давление взрыва в пределах паровоздушного облака, кПа; $P_{\text{max}} = 2,1P_0(w/a_0)^2/(1 + w/a_0)$; $P_{\text{max}} = 47,72$ кПа при $w/a_0 = 0,6$ [45];

G, H — константы, равные соответственно 0,467 и 1,140 при $w/a_0 = 0,6$ [45];

R_{nr} — радиус облака после окончания горения, м; $R_{nr} = \sigma^{1/3} = 1,845$ м;

$\sigma = 4 + 4C_H/C_{\text{ctx}}$; $\sigma = 6,28$;

C_H, C_{ctx} — нижний концентрационный предел воспламенения и стехиометрическая концентрация циклогексана, %; $C_H = 1,3$ % [42], $C_{\text{ctx}} = 2,28$ %.

⁷ В РБ Г-05-039–96 используется не совсем корректный термин — “скорость фронта пламени”, который, вероятно, произошел от буквального перевода с английского “flame speed”.

Из рис. 4 видно, что наилучшие предсказания наблюдаются при применении экспресс-метода РБ Г-03-039–96 на расстоянии не менее 700 м для случая воздушной детонации 37,9 т циклогексана⁸. В ближней области (до 150 м) за пределами паровоздушного облака методика РБ Г-03-039–96 дает приемлемый прогноз в режиме детонации для 4,5 т циклогексана.

Методы РД 03-409–01, Дорощева и ВНИИПО

В РД 03-409–01, как и в РБ Г-03-039–96, заложены возможности осуществления VCE в режимах как детонации, так и дефлаграции, но в отличие от РБ в нем предусмотрен способ выбора режима VCE в зависимости от степени загроможденности окружающего пространства и класса горючего вещества по степени чувствительности. Циклогексан по этой классификации относится к 3-му классу, т. е. к среднечувствительным веществам, для которых размер детонационной ячейки составляет от 10 до 40 см. Для этого класса органических веществ методика РД не предусматривает протекания VCE в режиме детонации [46], хотя известны реальные случаи детонации паров жидкостей, относящихся даже к 4-му классу, т. е. к слабочувствительным веществам [2].

Исходя из плана предприятия “Нипро” (см. рис. 3) его окружающее пространство может быть отнесено к 1-му виду по степени загроможденности (наличие условий для формирования турбулентных струй продуктов сгорания) или ко 2-му виду (сильно загроможденное пространство). Результаты прогнозов избыточного давления по методу РД 03-409–01 [46] с использованием уравнений (12)–(15) приведены на рис. 5.

На рис. 5 представлены также реперные значения избыточного давления взрыва и результаты расчетов для режимов дефлаграции, гомо- и гетерогенной детонации по формулам (13), (15) и (16):

$$P^* = \min(P_1^*, P_2^*); \quad (12)$$

$$P_{\text{взр}} = P^* P_0; \quad (13)$$

$$P_1^* = \left(\frac{u}{a_0}\right)^2 \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R^*} - \frac{0,14}{(R^*)^2}\right); \quad (14)$$

$$P_2^* = \exp(-1,124 - 1,66 \ln R^* + 0,26 (\ln R^*)^2); \quad (15)$$

$$P^* = \frac{0,125}{R^*} + \frac{0,137}{(R^*)^2} + \frac{0,023}{(R^*)^3}, \quad (16)$$

где P^*, P_1^*, P_2^* — приведенные давления взрыва; u — скорость распространения фронта пламени, м/с;

⁸ При наземном VCE в режиме детонации считается, что 50 % энергии взрыва уходит на образование воронки [10].

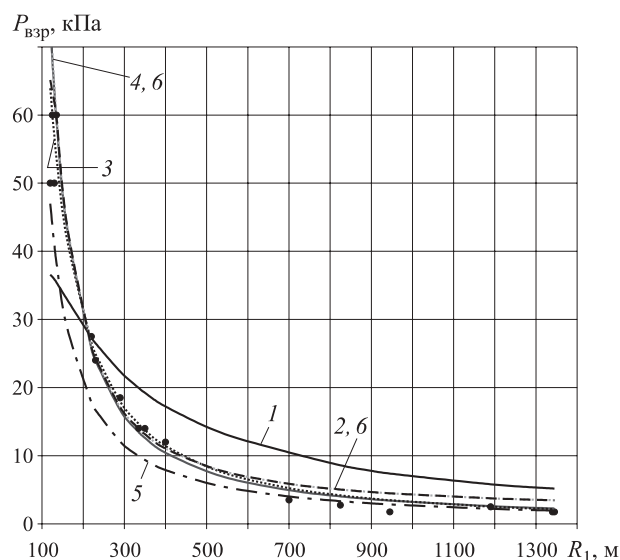


Рис. 5. Результаты прогнозирования для циклогексана по методам РД 03-409-01, Дорофеева и ВНИИПО: точки — данные таблицы; 1 — режим дефлаграции при $u = 200$ м/с для 37,9 т; 2 — режим дефлаграции при $u = 300$ м/с для 8 т; 3 — режим детонации для 5 т по методу Дорофеева; 4 — режим гетерогенной детонации для 10 т; 5 — режим детонации для 37,9 т по методу ВНИИПО; 6 — режим детонации или дефлаграции при $u = 500$ м/с для 8 т

R^* — параметр Сахса (Sach);

$R^* = R_1 / [(E/P_0)^{1/3}]$;

E — энергия взрыва, Дж/кг.

С позиций РД 03-409-01 последствия взрыва во Фликсборо в ближней и средних областях могут быть описаны как дефлаграция при массе циклогексана 8 т и скорости распространения пламени 500 м/с. Хотя в РД для горючих газов и жидкостей 3-го класса не предусмотрен режим детонации, расчет для гетерогенной детонации при массе циклогексана 10 т дает более приемлемые результаты по сравнению с дефлаграцией при его массе 8 т (см. рис. 5).

В методе Дорофеева для режимов гетерогенной детонации и дефлаграции также применяются формулы (12)–(16). В случае детонации используется уравнение [8]:

$$P^* = \frac{0,34}{(R^*)^{4/3}} + \frac{0,062}{(R^*)^2} + \frac{0,0033}{(R^*)^3}. \quad (17)$$

Прогноз детонационного взрыва 5 т циклогексана по методу Дорофеева близок к реперным точкам.

Для определения избыточного давления взрыва в зависимости от расстояния R_1 на открытом воздухе в методе ВНИИПО (СП 12.13130.2009 и ГОСТ Р 12.3.047-2012) используется уравнение [47, 48]:

$$P_{\text{взр}} = P_0 \left(\frac{0,8m_{\text{пр}}^{0,33}}{R} + \frac{3m_{\text{пр}}^{0,66}}{R^2} + \frac{5m_{\text{пр}}}{R^3} \right), \quad (18)$$

где $m_{\text{пр}}$ — приведенная масса газа или пара, кг;

$m_{\text{пр}} = mZ(Q_{\text{сг}}/Q_0)$;

m — масса горючих паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг;

Z — коэффициент участия; $Z = 0,1$ [47, 48];

$Q_{\text{сг}}$ — удельная теплота сгорания, Дж/кг;

$Q_{\text{сг}} = 4,344 \cdot 10^7$ Дж/кг [42];

Q_0 — константа, Дж/кг; $Q_0 = 4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Из рис. 5 видно, что методика ВНИИПО дает приемлемые значения $P_{\text{взр}}$ только для дальней области.

TNO- и BST-методы

В “желтой книге” Нидерландской организации прикладных научных исследований TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) для прогнозирования последствий VCE предложены два способа: ТНТ-эквивалентный (TNT-equivalency) и мультиэнергетический (Multi-energy или ME) [49]. В основе ТНТ-эквивалентного метода заложено уравнение (19) и диаграмма Маршалла, которая хорошо описывается уравнением (20) [50, 51]:

$$Q_{\text{TNT}} = \alpha_e \frac{Q_f E_{\text{mf}}}{E_{\text{mTNT}}}; \quad (19)$$

$$P_{\text{взр}} = \frac{1772}{z^3} - \frac{114}{z^2} + \frac{108}{z}, \quad (20)$$

где Q_{TNT} — эквивалентная масса горючего вещества по ТНТ, кг;

α_e — ТНТ-эквивалент по энергии; обычно принимается $\alpha_e = 0,1$ [49];

Q_f — масса горючего вещества, кг;

E_{mf} — удельная теплота сгорания горючего вещества, МДж/кг; для циклогексана принимается $E_{\text{mf}} = 43,440$ МДж/кг [42];

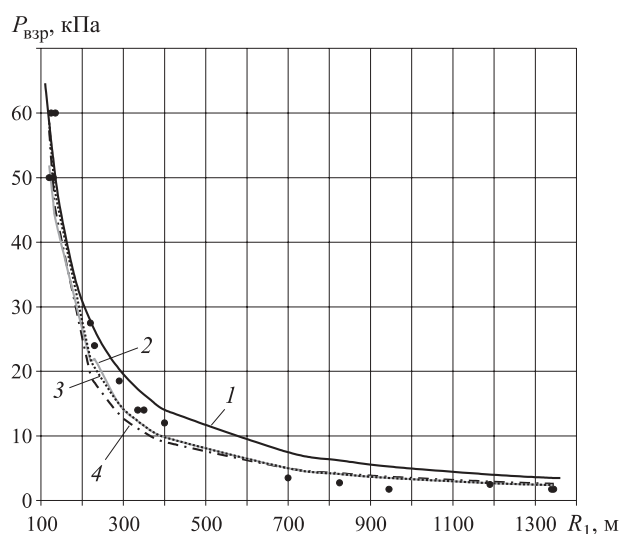


Рис. 6. Результаты прогнозирования по методам TNO: точки — данные таблицы; 1 — 2,5D-конфигурация BST2-метода для 16 т; 2 — 7-й класс VCE по методу ME-TNO для 5,5 т; 3 — 8–10-й классы VCE по методу ME-TNO для 5,5 т; 4 — ТНТ-эквивалентный метод для 37,9 т

E_{mTNT} — удельная энергия взрыва ТНТ, МДж/кг;
 $E_{mTNT} = (4,19 \div 4,65)$ МДж/кг [49];
 z — приведенное расстояние от эпицентра взрыва; $z = R_1/(Q_{TNT})^{1/3}$.

Результаты расчета по формуле (19) представлены на рис. 6. На основании сравнения рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что вариант ТНТ-метода, представленного в РД 03-409-01, лучше описывает последствия взрыва во Фликсборо, чем ТНТ-эквивалентный метод TNO.

Прогнозирование по методам ME-TNO и BST2 выполнено с помощью программного обеспечения

компаний “GEXCON” и “TAM Consulting, L. L. C”. Из сопоставления рис. 5 и 6 следует, что в случае детонационного взрыва, который имел место 1 июня 1976 г. на предприятии “Нипро”, ТНТ-метод РД 03-409-01 лучше описывает картину разрушений от VCE, чем методы ME-TNO и BST2.

Таким образом, на основании сравнительного анализа отечественных и зарубежных методов установлено, что последствия реального взрыва во Фликсборо лучше всего описываются ТНТ-методом из РД 03-409-01 и уравнением Дорофеева для режима детонации.

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. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2 // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 3. — С. 6–12.
9. 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.
10. Маршалл В. Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989. — 672 с.
11. The Flixborough disaster. Report of the Court of Inquiry // Report of Department of Employment of H. M. S. O. — London: Her Majesty's Stationery Office, 1975. — 93 p.
12. Krasnova V. M., Drobzheva Ya. V., Venartb J. E. S., Lastovickac J. A re-analysis of the atmospheric and ionospheric effects of the Flixborough explosion // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2003. — Vol. 65, No. 11–13. — P. 1205–1212. doi: 10.1016/j.jastp.2003.07.010.
13. Advisory committee on major hazards. Second report // Report of Health & Safety Commission. — London: Her Majesty's Stationery Office, 1979. — 67 p.
14. Bauwens C. R., Dorofeev S. B. Effects of the primary explosion site and bulk cloud in VCE prediction: a comparison with historical accidents // Process Safety Progress. — 2015 (in press). doi: 10.1002/prs.11703.
15. Sadee C., Samuels D. E., O'Brien T. P. The characteristics of the explosion of cyclohexane at the Nipro (UK) Flixborough plant on 1st June 1974 // Journal of Occupational Accidents. — 1977. — Vol. 1, No. 3. — P. 203–235. doi: 10.1016/0376-6349(77)90001-3.
16. Hoiset S., Hjertager B. H., Solberg T., Malo K. A. Flixborough revisited — an explosion simulation approach // Journal of Hazardous Materials. — 2000. — Vol. 77, No. 1–3. — P. 1–9. doi: 10.1016/S0304-3894(00)00197-7.

17. Roberts A. F., Pritchard D. K. Blast effect from unconfined vapour cloud explosions // Journal of Occupational Accidents. — 1982. — Vol. 3, No. 4. — P. 231–247. doi: 10.1016/0376-6349(82)90001-3.
18. Hendershot D. Remembering Flixborough // Journal of Chemical Health and Safety. — 2009. — Vol. 16, No. 3. — P. 46–47. doi: 10.1016/j.jchas.2009.03.006.
19. Venart J. E. S. Flixborough: the explosion and its aftermath // Process Safety and Environmental Protection. — 2004. — Vol. 82, No. 2. — P. 105–127. doi: 10.1205/095758204322972753.
20. Marigo M. Il piu' grande disastro industriale di sempre e l'analisi dei rischi // Igiene e Sicurezza del Lavoro. — 2014. — No. 7. — P. 344–352.
21. Assael M. J., Kakosimos K. E. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions. Effects Calculation and Risk Analysis. — Boca Raton : CRC Press, 2010. — 345 p.
22. CCPS. Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases. — Hoboken : J. Wiley & Sons, 2012. — 217 p.
23. CCPS. Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE, and Flash Fire Hazards. — Hoboken : J. Wiley & Sons, 2010. — 447 p.
24. Lees' Process Safety Essentials. Hazard Identification, Assessment and Control / S. Mannan (ed.). — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. — Vol. 3. — 1157 p.
25. CCPS. Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases. — N. Y. : AIChE, 1999. — 348 p.
26. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. — Amsterdam : Elsevier, 2008. — 379 p.
27. Булхов Н. Н. Усовершенствование методов оценки условий возникновения и последствий взрывов на металлургических предприятиях : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 185 с.
28. CCPS. Guidelines for evaluating characteristics of vapor cloud explosion, flash fire hazards, and BLEVEs. — N. Y. : AIChE, 1994. — 401 p.
29. Cox J. I. Flixborough — some additional lessons // The Chemical Engineer. — 1976. — No. 309. — P. 353–358.
30. Kletz T. A. The Flixborough explosion — ten years later // Process Safety Progress. — 1984. — Vol. 3, No. 3. — P. 133–135. doi: 10.1002/prsb.720030304.
31. Venart J. E. S. Flixborough : a final footnote // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2007. — Vol. 20, No. 4–6. — P. 621–643. doi: 10.1016/j.jlp.2007.05.009.
32. Hearne K. M. T. An ostensible precognition of the 1974 Flixborough disaster // Journal of the Society for Psychical Research. — 1982. — Vol. 51, No. 790. — P. 210–213.
33. King R., Hirst R., Evans G. King's safety in the process industries. — London : Arnold, 1998. — 660 p.
34. Kletz T. Learning from Accidents. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. — 357 p.
35. Mannan S. Lees' Process safety essentials. Hazard identification, assessment and control. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. — 539 p.
36. Eckhoff R. K. Explosion hazards in the process industries. — Houston : Gulf Publishing Company, 2005. — 469 p.
37. Crowl D. A. CCPS. Understanding explosions. — N. Y. : AIChE, 2003. — 222 p.
38. Sanders R. E. Chemical process safety. Learning from case histories. — Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. — 344 p.
39. Vaidogas E. R., Juocevičius V. Sustainable development and major industrial accidents: The beneficial role of risk-oriented structural engineering // Baltic Journal on Sustainability. — 2008. — Vol. 14, No. 4. — P. 612–627. doi: 10.3846/1392-8619.2008.14.612-627.
40. Сайт Virtual Tenby. URL : <http://www.virtu-altenby.co.uk/video.asp?About=Flixborough&HD=HOINh3mUw5g> (дата обращения: 17.01.2015).
41. Сайт “Пожарные машины. Энциклопедия пожарной техники”. URL : <http://fire-truck.ru/encyclopedia/html> (дата обращения: 17.01.2015).
42. Chemical Database DIPPR 801. URL : <http://www.aiche.org/dippr/> (дата обращения: 17.01.2015).
43. Lees' process safety essentials. Hazard identification, assessment and control / S. Mannan (ed.). — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. — Vol. 1. — 1456 p.
44. Бесчастнов М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. — М. : Химия, 1991. — 432 с.
45. РБ Г-5-05-039–96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического воздействия. — М. : НТИЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000. — 40 с.
46. РД 03-409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 26.06.2001 № 25. Доступ из справ.-правовой системы “КонсультантПлюс”. URL : <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=334178> (дата обращения: 10.06.2013).

47. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). Доступ из справ.-правовой системы “КонсультантПлюс”.
48. ГОСТ Р 12.3.047–2012. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — Введ. 01.01.2000. — М. : Стандартинформ, 2014. — 62 с.
49. CPR 14E. 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.
50. Moon N. N. Prediction of blast loading and its impact on buildings : diss. ... master of technology in civil engineering. — National Institute of Technology (India), 2009. — 96 p.
51. Zhou F. Blast/explosion resistant analysis of composite steel girder bridge system : diss. ... master of science. — Florida Atlantic University, 2009. — 208 p.

Материал поступил в редакцию 2 марта 2015 г.

English

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNIQUES OF FORECASTING VCE ON AN EXPLOSION EXAMPLE IN FLIXBOROUGH

ALEXEEV S. G., Candidate of Chemistry Sciences, Docent (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” (Bolshhevistskaya 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)

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

POLISHCHUK E. Yu. Candidate of Technical Sciences, Head of Investigation of Fires Department, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: epyur@ya.ru)

ABSTRACT

On June, 1st, 1976 at the company “Nipro” in Flixborough of Great Britain there was an explosion of cyclohexane which has entered into ten of major accidents of 20th century. Despite the conducted numerous investigations of this industrial explosion a number of the technical moments of failure at the company “Nipro” are remained unknown. In particular, TNT-equivalent forecasts fluctuates largely from 15 to 55 tons. In this connection it is found that the high bound of theoretically possible weight of cyclohexane in a vapor cloud is able to make 37,9 tons. On the basis of mathematical processing of the Sadee’s data it is positioned that for considered failure dependence of excessive pressure of explosion ΔP on distance R is described by equation $\Delta P = 94970R^{-1,526}$ with factor of correlation 0,990. This circumstance allows to use the Sadee’s data as the standard for verification of techniques of forecasting of consequences of vapor cloud explosions. As a result of the made verification of methods of RB G-05-039–96, RD 03-409–01, the SP 12.13130.2009, GOST P 12.3.047–2012, Dorofeev, TNO and BST2 is positioned that consequences of real explosion in Flixborough is better are described TNT-method from RD 03-409–01 and the Dorofeev’s equation for the detonation mode.

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

REFERENCES

1. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 37–47. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpzb2010> (Accessed 10 January 2013).
2. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 21–27. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpzb2011> (Accessed 10 January 2013).
3. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Timashev S. A., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — 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 vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — 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 vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — 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 vzryvopozharoopasnosti 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)]. *Pozharovzryvbezopasnost — 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 [Methods of explosion fire hazard of fuel and air mixtures on an example for jetfuel RT. VII. BST methods]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 23–30.
8. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev Ye. S. Metody otsenki vzryvopozharoopasnosti toplivovozdushnykh smesey na primere kerosina marki RT. VII. Sravneniye 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 6–12.
9. 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.
10. 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.).
11. The Flixborough disaster. Report of the Court of Inquiry. Report of Department of Employment of H. M. S. O. London, Her Majesty's Stationery Office, 1975. 93 p.
12. Krasnova V. M., Drobzheva Ya. V., Venart J. E. S., Lastovickac J. A re-analysis of the atmospheric and ionospheric effects of the Flixborough explosion. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, vol. 65, no. 11–13, pp. 1205–1212. doi: 10.1016/j.jastp.2003.07.010.
13. Advisory committee on major hazards. Second report. *Report of Health & Safety Commission*. London, Her Majesty's Stationery Office, 1979. 67 p.
14. Bauwens C. R., Dorofeev S. B. Effects of the primary explosion site and bulk cloud in VCE prediction: a comparison with historical accidents. *Process Safety Progress*, 2015 (in press). doi: 10.1002/prs.11703.
15. Sadee C., Samuels D. E., O'Brien T. P. The characteristics of the explosion of cyclohexane at the Nypro (UK) Flixborough plant on 1st June 1974. *Journal of Occupational Accidents*, 1977, vol. 1, no. 3, pp. 203–235. doi: 10.1016/0376-6349(77)90001-3.

16. Høiset S., Hjertager B. H., Solberg T., Malo K. A. Flixborough revisited — an explosion simulation approach. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, vol. 77, no. 1–3, pp. 1–9. doi: 10.1016/S0304-3894(00)00197-7.
17. Roberts A. F., Pritchard D. K. Blast effect from unconfined vapour cloud explosions. *Journal of Occupational Accidents*, 1982, vol. 3, no. 4, pp. 231–247. doi: 10.1016/0376-6349(82)90001-3.
18. Hendershot D. Remembering Flixborough. *Journal of Chemical Health and Safety*, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 46–47. doi: 10.1016/j.jchas.2009.03.006.
19. Venart J. E. S. Flixborough: the explosion and its aftermath. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004, vol. 82, no. 2, pp. 105–127. doi: 10.1205/095758204322972753.
20. Marigo M. Il piu' grande disastro industriale di sempre e l'analisi dei rischi. *Igiene e Sicurezza del Lavoro*, 2014, no. 7, pp. 344–352.
21. Assael M. J., Kakosimos K. E. *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions. Effects Calculation and Risk Analysis*. Boca Raton, CRC Press, 2010. 345 p.
22. CCPS. *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases*. Hoboken, J. Wiley & Sons, 2012. 217 p.
23. CCPS. *Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards*. Hoboken, J. Wiley & Sons, 2010. 447 p.
24. Lees' process safety essentials. *Hazard identification, assessment and control*. S. Mannan (ed.). Oxford, Butterworth-Heinemann, 2014, vol. 3. 1157 p.
25. CCPS. *Guidelines for consequence analysis of chemical releases*. N. Y., AIChE, 1999. 348 p.
26. Casal J. *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 379 p.
27. Bulkhov N. N. Usovershenstvovaniye metodov otsenki usloviy vozniknoveniya i posledstviy vzryvov na metallurgicheskikh predpriyatiyakh. Dis. kand. tekhn. nauk [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.
28. CCPS. *Guidelines for evaluating characteristics of vapor cloud explosion, flash fire hazards, and BLEVEs*. N. Y., AIChE, 1994. 401 p.
29. Cox J. I. Flixborough — some additional lessons. *The Chemical Engineer*, 1976, no. 309, pp. 353–358.
30. Kletz T. A. The Flixborough explosion — ten years later. *Process Safety Progress*, 1984, vol. 3, no. 3, pp. 133–135. doi: 10.1002/prsb.720030304.
31. Venart J. E. S. Flixborough: a final footnote. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, vol. 20, no. 4–6, pp. 621–643. doi: 10.1016/j.jlp.2007.05.009.
32. Hearne K. M. T. An ostensible precognition of the 1974 Flixborough disaster. *Journal of the Society for Psychical Research*, 1982, vol. 51, no. 790, pp. 210–213.
33. King R., Hirst R., Evans G. *King's Safety in the Process Industries*. London, Arnold, 1998. 660 p.
34. Kletz T. *Learning from accidents*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001. 357 p.
35. Mannan S. *Lees' Process safety essentials. Hazard identification, assessment and control*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2014. 539 p.
36. Eckhoff R. K. *Explosion hazards in the process industries*. Houston, Gulf Publishing Company, 2005. 469 p.
37. Crowl D. A. CCPS. *Understanding Explosions*. N. Y., AIChE, 2003. 222 p.
38. Sanders R. E. *Chemical process safety. Learning from case histories*. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 344 p.
39. Vaidogas E. R., Juocevičius V. Sustainable development and major industrial accidents: The beneficial role of risk-oriented structural engineering. *Baltic Journal on Sustainability*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 612–627. doi: 10.3846/1392-8619.2008.14.612-627.
40. *Virtual Tenby*. Available at: <http://www.virtu-altenby.co.uk/video.asp?About=Flixborough&HD=HOINh3mUw5g> (Accessed 17 January 2015).
41. *Pozharnyye mashiny. Entsiklopediya pozharnoy tekhniki* [Fire-engines. The encyclopaedia of fire techniques]. Available at: <http://fire-truck.ru/encyclopedia/.html> (Accessed 17 January 2015).
42. Chemical Database DIPPR 801. Available at: <http://www.aiche.org/dippr/> (Accessed 17 January 2015).
43. Mannan S. (ed.). *Lees' process safety essentials. Hazard identification, assessment and control*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2014, vol. 1. 1456 p.
44. Beschastnov M. V. *Promyshlennyye vzryvy. Otsenka i preduprezhdeniye* [Industrial explosions. An estimation and the prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 432 p.
45. *Guides to safety G-05-039–96. Manual for analysis of accident explosion hazards and determination of them mechanical action*. Moscow, NTTs YaRB Gosatomnadzor Rossii Publ., 2000. 40 p. (in Russian).

46. 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 June 2013) (in Russian).
47. Set of rules 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard. Available at: <http://www.consultant.ru/search/?q=%D1%CF+12.13130.2009> (Accessed 10 February 2015) (in Russian).
48. National Standard of the Russian Federation 12.3.047-98. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 62 p. (in Russian).
49. 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.
50. Moon N. N. Prediction of blast loading and its impact on buildings. Master of technology in civil engineering diss. National Institute of Technology (India), 2009. 96 p.
51. Zhou F. Blast/explosion resistant analysis of composite steel girder bridge system. Master of science diss. Florida Atlantic University, 2009. 208 p.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Предлагает вашему вниманию

Л. П. Пилюгин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВНУТРЕННИХ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ



Настоящая книга посвящена проблеме прогнозирования последствий внутренних взрывов газо-, паро- и пылевоздушных горючих смесей (ГС), образующихся при аварийных ситуациях на взрывоопасных производствах. В книге материал излагается применительно к дефлаграционным взрывам, которые обычно имеют место при горении ГС на этих производствах.

В качестве основных показателей при прогнозировании последствий аварийных взрывов ГС рассматриваются ожидаемый характер и объем разрушений строительных конструкций в здании (сооружении), в котором происходит аварийный взрыв.

Книга продолжает исследования автора в области проектирования зданий взрывоопасных производств и оценки надежности строительных конструкций (на основе метода преобразования рядов распределения случайных величин).

С использованием методов теории вероятностей разработаны методики: определения характеристик взрывной нагрузки как случайной величины; оценки вероятностей разрушения конструкций, характера и объема разрушений в здании при внутреннем аварийном взрыве. Приведенные методики сопровождаются примерами расчетов для зданий различных объемно-планировочных решений.

121352, г. Москва, а/я 43;
тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: mail@firepress.ru