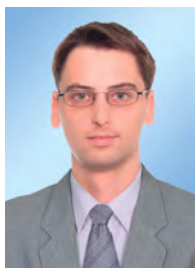


УДК 534.222.2.004.74.006.02

© Коллектив авторов, 2011



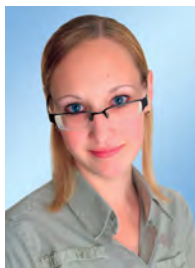
К.В. Ефремов,
мл. науч. сотрудник



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук,
директор центра
анализа риска



А.С. Софьин,
мл. науч. сотрудник



Е.А. Самусева,
науч. сотрудник



С.И. Сумской,
канд. техн. наук, науч.
сотрудник



А.П. Кириенко,
нач. отдела

(ЗАО НТЦ ПБ)

(АНО АИПР)

(ОАО «Орен-
бургнефть» ТНК-ВР)

Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах

Сравниваются расчеты зон разрушения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей, определяемых по российским методикам (РД 03-409—01, ПБ 09-540—03) и методике фирмы TNO (Нидерланды), с экспериментальными данными по взрывам водородовоздушной смеси. Предложен методический подход к оценке риска разрушения зданий и сооружений при аварийных взрывах на опасных производственных объектах.

The paper presents comparison of calculation of destruction zones resulted from outer explosions of fuel-air mixtures, made in accordance with the Russian methods (RD 03-409—01, PB 09-540—03) and methods of TNO (The Netherlands), with the experimental data on hydrogen-air mixture explosions. It proposes technical approach to assessment of buildings and structures fracture risk during accidental explosions at hazardous production facilities.

Ключевые слова: аварийный выброс, топливно-воздушная смесь, ударная волна, взрывоустойчивость зданий, анализ риска.

Общие требования об учете риска взрыва и взрывных нагрузок при проектировании изложены в Федеральном законе от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1], Федеральном законе от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [2], в Общих правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств [3], в Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей [4] и других нормативных документах [5–8].

Опыт экспертизы проектной документации и деклараций промышленной безопасности взры-

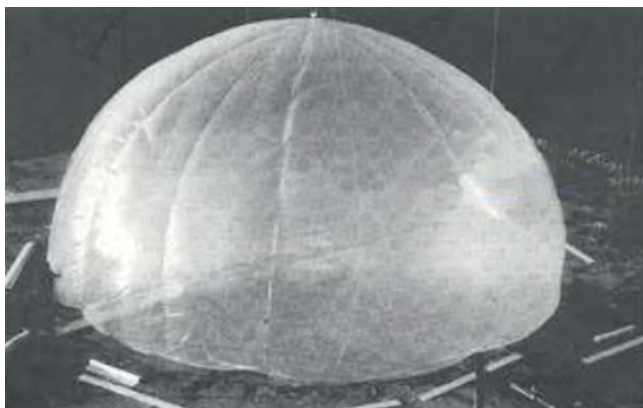
воопасных объектов выявляет типичные ошибки и трудности, связанные с расчетом взрывных процессов (расчет массы вещества выброса и массы вещества, участвующего во взрыве; обоснование критериев разрушения, учет условий окружающей среды; отсутствие количественных критериев взрывоустойчивости; различие результатов расчетов, выполненных по различным нормативным методикам и др.). Применение при проектировании зарубежных компьютерных программ (нередко без описания заложенных в них моделей) вызывает трудности прохождения экспертизы проектной документации, в том числе из-за отсутствия процедуры проверки их соответствия.

Необходимость совершенствовать методики и повышать достоверность расчетов последствий взрыва связана с тем, что завышенные значения расчетных зон разрушения нередко требуют чрезмерных затрат на увеличение прочности конструкций и взрывоустойчивости зданий, сооружений или их удаление на значительное расстояние от возможных источников взрыва (до нескольких километров).

Для решения указанных проблем рассмотрим следующие основные вопросы: верификация¹ математических моделей расчета последствий взрыва, проверка обоснованности применяемых методик, компьютерных программ; сравнение российских методик с зарубежными; расчет массы вещества, участвующего во взрыве; уточнение критериев разрушения различных типов зданий и сооружений, вероятности поражения людей при взрывах; применение количественного анализа риска разрушения зданий и сооружений.

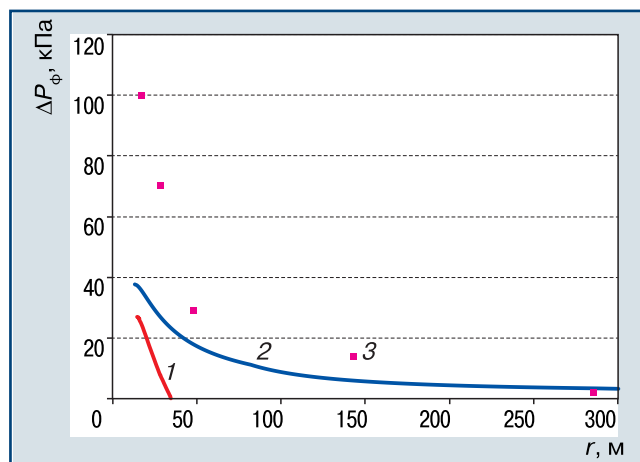
1. Верификация математических моделей взрыва

Верификация математических моделей взрывных процессов с экспериментальными данными затруднена из-за крайне малого числа экспериментов с большим количеством опасного вещества. Одно из таких экспериментальных исследований выполнено в Институте химической технологии Фраунгофера (Германия) [9]. Постановка эксперимента была следующей: полусферический купол с мягкими стенками (рис. 1) радиусом 10 м, расположенный на равнинной поверхности, наполняли стехиометрической водородовоздушной смесью



▲ Рис. 1. Эксперимент с водородом

¹ Верификация — проверка, проверяемость, способ подтверждения каких-либо теоретических положений, алгоритмов, программ и процедур путем их сопоставления с опытными (эталонными или эмпирическими) данными, алгоритмами и программами (ru.wikipedia.org).



▲ Рис. 2. Изменение избыточного давления во фронте ударной волны от взрыва водородовоздушной смеси: 1 — в эксперименте; 2 — смоделированное по методике РД 03-409—01; 3 — по методике ПБ 09-540—03

под давлением 100 кПа. Масса водорода составляла 51 кг; горение инициировали по центру. С помощью нескольких датчиков фиксировали изменение избыточного давления во фронте ударной волны ΔP_{ϕ} с расстоянием r (рис. 2, кривая 1).

Для численного моделирования данного эксперимента по методикам РД 03-409—01 [4] и ПБ 09-540—03 [3] использовали программный комплекс «ТОКСИ+Risk» [10]. Результаты моделирования по обеим методикам (см. рис. 2) демонстрируют консервативность полученных оценок зависимости избыточного давления во фронте ударной волны ΔP_{ϕ} от расстояния r до центра взрыва. Необходимо отметить, что расчет по модели ПБ 09-540—03 завышает значения избыточного давления, измеренные в ходе эксперимента, более чем в 3 раза. На этом фоне результаты, полученные по методике РД 03-409—01, существенно менее консервативны. Так, давление, равное 20 кПа, согласно экспериментальным данным достигается на расстоянии 20 м, согласно РД 03-409—01 — 38 м, а ПБ 09-540—03 — более чем 100 м.

2. Сравнение российских методик с зарубежными

Проведен анализ различных подходов к расчетам последствий взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС), изложенных в российских нормативных документах (РД 03-409—01 и ПБ 09-540—03) и в зарубежной модели Multi-Energy Method [11] фирмы TNO (Нидерланды). Методика для определения радиуса зон поражения при взрывах, приведенная в ПБ 09-540—03, исполь-

зует формулу, полученную путем аппроксимации границ различных степеней разрушения кирпичных зданий в результате бомбардировок Великобритании во время Второй мировой войны [12]:

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}, \quad (1)$$

где K — безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект, значения которого приведены в ПБ 09-540—03 (прил. 2, табл. 2); W_T — тротилловый эквивалент, кг.

Основной недостаток данного подхода в том, что модель «тротилового эквивалента» не в полной мере отвечает реальным процессам, происходящим при промышленных авариях со взрывами опасного вещества (ОВ), для которых характерен

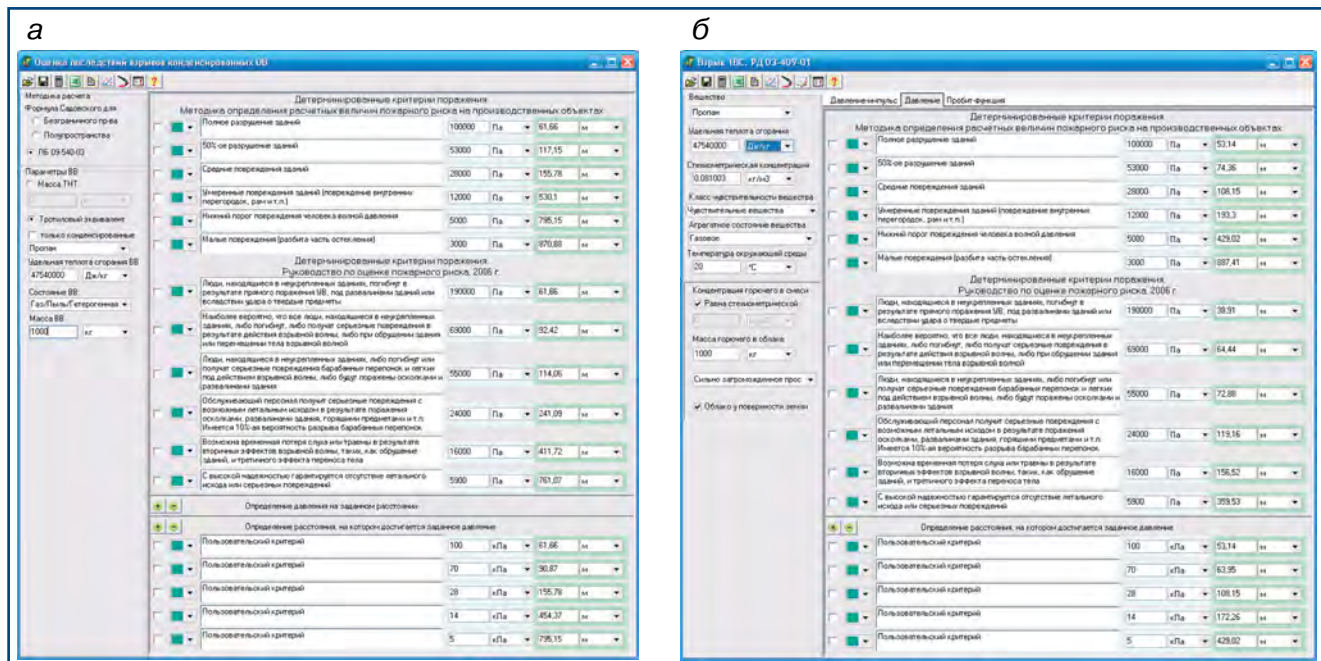
дефлаграционный, а не детонационный режим взрывного превращения. Также ПБ 09-540—03 не позволяет учитывать ряд других важных условий и факторов, влияющих на развитие и последствия взрыва, такие, например, как агрегатное состояние опасного вещества, характеристики окружающего пространства и положения точки инициирования взрывоопасного облака.

Указанные недостатки отсутствуют в методике оценки последствий аварийных взрывов, изложенной в РД 03-409—01¹.

В настоящее время за рубежом расчеты последствий взрыва, как правило, проводят по модели Multi-Energy Method [11]. Для сравнения этой модели с РД 03-409—01 приведем выполненные специалистами ЗАО НТЦ ПБ результаты проверки безопасности зданий поселка строителей, расположенных на расстоянии 300–600 м от модулей (сооружений), содержащих пропан. Для

Таблица 1

| Объем емкостей с пропаном, м ³ | Расстояние до поселка строителей, м | ΔP_{ϕ} в поселке, кПа | | Δ , % | Расстояние, м, от центра взрыва до точки достижения ΔP_{ϕ} , кПа, значения | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|
| | | ТНО | РД 03-409—01 | | 6,9 | | Δ , % | 4,1 | | Δ , % |
| | | | | | ТНО | РД 03-409—01 | | ТНО | РД 03-409—01 | |
| 11 064 | 496 | 3,5 | 4,2 | 17 | 258 | 240,1 | 7 | 424 | 358,1 | 16 |
| 8065 | 513 | 3,0 | 3,7 | 19 | 233 | 216,1 | 7 | 382 | 322,3 | 16 |
| 9700 | 513 | 3,2 | 3,9 | 18 | 248 | 229,8 | 7 | 405 | 342,7 | 15 |
| 17 817 | 568 | 3,6 | 4,2 | 14 | 305 | 281,4 | 8 | 495 | 419,7 | 15 |
| 4928 | 381 | 3,5 | 4,1 | 15 | 198 | 183,3 | 7 | 325 | 273,5 | 16 |



▲ Рис. 3. Модули ТОКСИ+Risk для расчета последствий взрыва ТВС по методикам ПБ 09-540—03 (а) и РД 03-409—01 (б)

¹ Алгоритм расчета РД 03-409—01 полностью перенесен в методику [6], за исключением неточностей в применимости формул (5) и (6) и учета фазового состояния горючего в ТВС.

Таблица 2

| Повреждение | Расстояние от места инициирования взрыва до зоны с соответствующими повреждениями, м, при массе пропана, кг | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|--------|------|------|
| | 1000 | | Δ, % | 2000 | | Δ, % | 5000 | | Δ, % | 10 000 | | Δ, % |
| | [4] | [3] | | [4] | [3] | | [4] | [3] | | [4] | [3] | |
| Сильное повреждение всех зданий ($\Delta P_{\phi} > 100$ кПа) | 53 | 62 | 16 | 67 | 81 | 21 | 91 | 111 | 22 | 114 | 140 | 23 |
| Среднее повреждение зданий с массовыми обвалами ($\Delta P_{\phi} = 70$ кПа) | 64 | 91 | 42 | 81 | 119 | 48 | 109 | 164 | 50 | 138 | 207 | 50 |
| Среднее повреждение промзданий ($\Delta P_{\phi} = 28$ кПа) | 108 | 156 | 44 | 136 | 204 | 50 | 185 | 281 | 52 | 233 | 355 | 52 |
| Разрушение оконных проемов, легкие повреждения фабричных труб ($\Delta P_{\phi} = 14$ кПа) | 172 | 454 | 164 | 217 | 596 | 175 | 295 | 819 | 178 | 371 | 1034 | 179 |
| Нижний порог повреждения человека волной давления ($\Delta P_{\phi} = 5$ кПа) | 429 | – | – | 541 | – | – | 734 | – | – | 924 | – | – |

Таблица 3

| Повреждение | Расстояние от места инициирования взрыва до зоны с соответствующими повреждениями, м, при массе метана, кг | | | | | | | | | | | |
|---|--|-----|------|-------|-----|------|-------|-----|------|--------|------|------|
| | 1000 | | Δ, % | 2000 | | Δ, % | 5000 | | Δ, % | 10 000 | | Δ, % |
| | [4] | [3] | | [4] | [3] | | [4] | [3] | | [4] | [3] | |
| Сильное повреждение всех зданий ($\Delta P_{\phi} > 100$ кПа) | Н. д. | 62 | – | Н. д. | 82 | – | Н. д. | 113 | – | Н. д. | 143 | – |
| Среднее повреждение зданий с массовыми обвалами ($\Delta P_{\phi} = 70$ кПа) | Н. д. | 91 | – | Н. д. | 121 | – | Н. д. | 167 | – | Н. д. | 211 | – |
| Среднее повреждение промзданий ($\Delta P_{\phi} = 28$ кПа) | 69 | 156 | 124 | 81 | 208 | 156 | 110 | 286 | 159 | 139 | 361 | 160 |
| Разрушение оконных проемов, легкие повреждения фабричных труб ($\Delta P_{\phi} = 14$ кПа) | 156 | 454 | 192 | 196 | 607 | 210 | 266 | 834 | 213 | 335 | 1053 | 214 |
| Нижний порог повреждения человека волной давления ($\Delta P_{\phi} = 5$ кПа) | 437 | – | – | 550 | – | – | 747 | – | – | 941 | – | – |

сравнения были представлены расчеты, выполненные по модели TNO Multi-Energy Method с помощью имитационной модели взрыва RIPRAP в системе ARAMAS.

Предполагалось полное разрушение оборудования, содержащего пропан в жидкой фазе, выброс его в окружающую среду, образование облака ТВС, ее инициирование.

Сравнение результатов расчетов избыточного давления во фронте ударной волны при возможных авариях в модулях, выполненных по моделям TNO и РД 03-409—01, представлено в табл. 1 (Δ — относительная разница между сравниваемыми величинами). Видно хорошее совпадение. Например, при одинаковом расстоянии значения ΔP_{ϕ} , рассчитанные согласно РД 03-409—01 и по модели TNO, совпадают с

точностью до 20 %. При этом значения безопасного расстояния, соответствующие избыточному давлению во фронте ударной волны, при котором происходит частичное разрушение остекления (по разным данным от 2 до 10 кПа), практически совпадают.


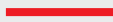

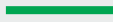

Далее рассмотрим вопросы различий результатов расчета ΔP_{ϕ} по действующим российским методикам. Расчеты для сравнения последствий модельных аварий по методикам [4] и [3] проводили с помощью соответствующих модулей программного комплекса ТОКСИ+Risk [10] (рис. 3).

Для сравнения были выбраны модельные аварии с выбросами в атмосферу различного количества (от 1 до 10 т) горючих газов — пропана (табл. 2) и метана (табл. 3). Расчеты по РД 03-409—01 [4] проводили в консервативных допущениях: concentra-

ция ОВ в ТВС равна стехиометрической, облако газовое и находится в момент взрыва у поверхности земли в условиях сильно загроможденного пространства с температурой окружающей среды 20 °С.

Из полученных в результате такого моделирования данных (см. табл. 2, 3) хорошо видно, что расчеты по ПБ 09-540—03 [3] зачастую дают размеры зоны поражения, более чем в 2

Таблица 4

| Повреждение | Радиус рассчитанной зоны поражения (разрушения), м | | Δ, % | Обозначение на рис. 4 |
|---|--|--------------|------|---|
| | РД 03-409—01 | ПБ 09-540—03 | | |
| Сильное повреждение всех зданий ($\Delta P_{\phi} > 100$ кПа) | Н. д. | 132 | – |  |
| Среднее повреждение зданий с массовыми обвалами ($\Delta P_{\phi} = 70$ Па) | 111 | 195 | 76 |  |
| Среднее повреждение промзданий ($\Delta P_{\phi} = 28$ кПа) | 219 | 339 | 55 |  |
| Разрушение оконных проемов ($\Delta P_{\phi} = 14$ кПа) | 350 | 974 | 178 |  |
| Частичное разрушение остекления, нижний порог повреждения человека волной давления ($\Delta P_{\phi} = 5$ кПа) | 870 | – | – |  |

раза превышающие значения, полученные в консервативных приближениях по методике РД 03-409—01 [4]. Что дает такое различие на практике? Возможность существенно сократить затраты на строительство за счет уменьшения безопасных расстояний по сравнению с затратами, основанными на расчетах этих расстояний по ПБ 09-540—03.

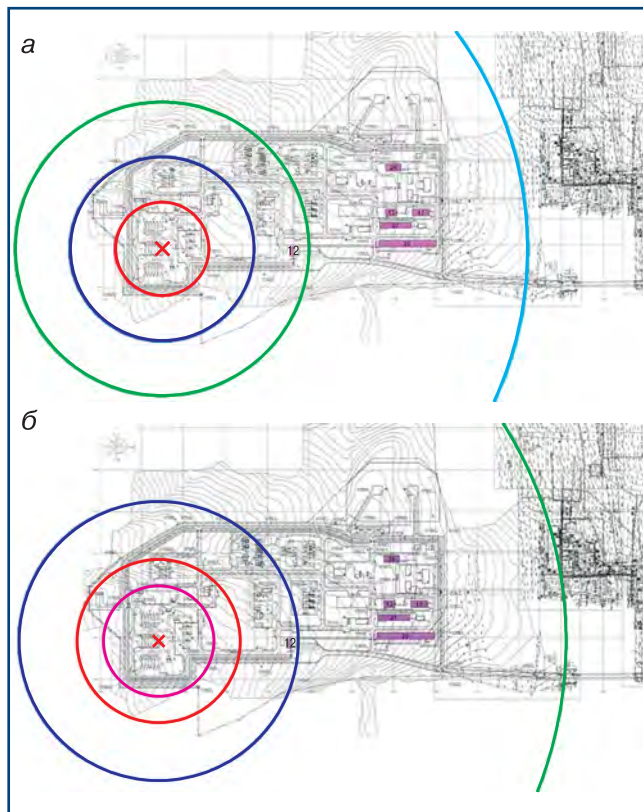
Для примера приведем результаты обоснования взрывоустойчивости (требования п. 10.4 ПБ 09-540—03) проектируемых зданий Покровской установки комплексной подготовки газа ОАО «Оренбургнефть». В качестве наиболее опасного сце-

нария со взрывом рассматривалось полное разрушение емкости объемом 200 м³, содержащей пропан-бутановую фракцию массой 86 т. Результаты моделирования для пропана массой 8351 кг, участвующего в создании взрывоопасной ТВС, представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Как видно из табл. 4, согласно расчету по ПБ 09-540—03 (см. рис. 4) — контрольно-пропускной пункт складов и проходная (см. поз. 12 на рис. 4) — располагаются в зоне средних повреждений. Для обеспечения взрывоустойчивости необходимо его удаление на большее расстояние или дополнительное повышение прочности конструкций: например, вместо здания с легким каркасом строительство здания с металлическим или железобетонным каркасом. Согласно расчетам по РД 03-409—01 все объекты находятся в зоне слабых разрушений (менее 14 кПа) и соответствуют требованиям взрывоустойчивости (отсутствие разрушения основных несущих и ограждающих конструкций).

3. Расчет массы вещества, участвующего во взрыве

Для оценки последствий аварийного выброса горючих веществ (топлива) и взрыва ТВС необходимы расчеты:



▲ Рис. 4. Ситуационный план сценария аварии со взрывом ТВС при полном разрушении емкости V-601A-R:

а — расчет по РД 03-409—01;

б — расчет по ПБ 09-540—03

массы топлива, образующего облако ТВС в атмосфере;

доли топлива (от общей массы топлива, попавшего в атмосферу), которая может участвовать в энерговыделении, т.е. находится во взрывоопасных концентрационных пределах воспламенения.

Анализ реальных аварий показывает, что не вся жидкая фаза, попадающая в окружающую среду, может переходить в атмосферу (жидкость может образовывать проливы). Более того, не все вещество, образующее облако, будет участвовать во взрыве. Доля вещества, участвующая во взрыве, как правило, не превышает 10 % массы вещества, оказавшегося в атмосфере, т.е. только около 10 % массы ОВ в облаке может сгореть (взорваться), а остальная масса выброшенного ОВ оказывается вне взрывоопасных пределов и не участвует в создании поражающих факторов, прежде всего ударной волны. Данное обстоятельство учитывается при инже-

нерных расчетах путем использования коэффициента участия доли ОВ во взрыве [3, 6, 8].

Для более точных оценок массу топлива, поступающего в атмосферу и формирующего там облако (облака), можно рассчитать с помощью различных подходов, используя, например, ПБ-09-540—03 [3] или РД-03-26—2007 [5]. Эта масса — не постоянная величина, а функция времени и условий окружающего пространства. Наиболее физически правильный подход к нахождению массы $Q_{вз}$ вещества, которое может участвовать во взрыве ТВС, — это расчет по формуле из РД-03-26—2007, согласно которой такая масса определяется путем интегрирования концентрации c по пространству, ограниченному поверхностями $\Sigma_{ВКПВ}$ и $\Sigma_{НКПВ}$:

$$Q_{вз} = \iiint_{\Sigma_{НКПВ} < V < \Sigma_{ВКПВ}} c(x, y, z, t_0) dx dy dz, \quad (2)$$

Таблица 5

| Тип зданий, сооружений | Избыточное давление во фронте ударной волны, кПа, при разрушении | | | |
|--|--|--------------|---------------|---------------|
| | слабом | среднем | сильном | полном |
| Промышленные здания с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом | 20–30 | 30–40 | 40–50 | >50 |
| Промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкции | 10–20 | 25–35 | 35–45 | >45 |
| Складские кирпичные здания | 10–20 | 20–30 | 30–40 | >40 |
| Одноэтажные складские помещения с металлическим каркасом и стеновым заполнением из листового металла | 5–7 | 7–10 | 10–15 | >15 |
| Бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции | От 25 до 35 | От 80 до 120 | От 150 до 200 | >200 |
| Здания железобетонные монолитные повышенной этажности | От 25 до 45 | От 45 до 105 | От 105 до 170 | От 170 до 215 |
| Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях | 10–15 | 15–25 | 25–35 | 35–45 |
| Деревянные дома | 6–8 | 8–12 | 12–20 | >20 |
| Подземные сети, трубопроводы | 400–600 | 600–1000 | 1000–1500 | 1500 |
| Трубопроводы наземные | 20 | 50 | 130 | – |
| Кабельные подземные линии | До 800 | – | – | 1500 |
| Цистерны для перевозки нефтепродуктов | 30 | 50 | 70 | 80 |
| Резервуары и емкости стальные наземные | 35 | 55 | 80 | 90 |
| Подземные резервуары | 40 | 75 | 150 | 200 |

где НКПВ и ВКПВ — соответственно нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения; V — объем; x, y, z — координаты; t_0 — момент времени.

4. Критерии разрушения зданий и сооружений, поражения людей

Критерии поражения различной степени тяжести людей, находящихся вне укрытий, наиболее полно представлены в документах [4, 6, 13]. В нормативных документах [4, 6] согласно [12] даны степени разрушения зданий, осредненные по различным их типам, в зависимости от $\Delta P_{ф}$. В табл. 5 приведены более точные критерии разрушения зданий и сооружений, учитывающие тип зданий и виды сооружений, полученные из различных источников [3, 4, 6, 7, 13, 14]. Эти данные рекомендуется применять при оценке ожидаемого ущерба от аварий аналогично стандарту [13].

На практике при оценке соответствия здания требо-

ваниям взрывоустойчивости предлагается исходить из положения п. 2.1.4 [15]: «Во взрывоустойчивых зданиях должна быть исключена возможность разрушения основных несущих и ограждающих конструкций. Допускаются повреждения конструкций случайного характера, не влияющие на их прочность, устойчивость и некоторые эксплуатационные характеристики, а также требующие незначительных материальных затрат на проведение ремонтных работ». Согласно критериям документов [4, 6] и табл. 5 таким условиям отвечает средняя степень повреждения зданий ($\Delta P_{\text{ф}}$ не более 28 кПа).

При более точной оценке взрывоустойчивости зданий необходимо учитывать динамические нагрузки, возникающие в элементах конструкций зданий в результате взаимодействия падающей волны сжатия со зданием (в общем виде изменение давления, импульса, напряжений во времени), в том числе ориентацию зданий относительно фронта ударной волны [12, 15].

5. Применение вероятностных методов расчета последствий взрыва, количественного анализа риска разрушений зданий и сооружений

Необходимость применения методологии анализа риска, как правило, связана с невозможностью обоснования проектных решений, основанных на учете только лишь рассчитанных последствий аварий. Особенно актуален этот вопрос при проектировании объектов, где используют нестабильные жидкости (газоконденсаты), сжиженные углеводородные газы в повышенных объемах. Примером таких производств могут служить современные заводы сжиженных природных газов, на которых используют резервуары объемом более 100 тыс. м³. Даже при частичном разрушении таких резервуаров дрейф взрывоопасного облака может достигать расстояния более 1 км.

При проведении количественного анализа риска взрыва рекомендуется:

рассчитывать вероятностные показатели взрывной нагрузки, в том числе распределение частоты возникновения определенного давления $\Delta P_{\text{ф}}$ в рассматриваемой точке территории

(аналог поля потенциального риска), в дополнение к общепринятым расчетам зон и степени разрушения, потенциального, индивидуального и других показателей риска;

использовать более точные (по сравнению с [3]) критерии разрушения зданий и поражения людей (см. табл. 5).

Для расчета условной вероятности гибели людей, находящихся в зданиях, рекомендуется применять данные работы [16] о гибели людей при разрушении зданий при взрывах и землетрясениях (табл. 6).

Таблица 6

| Тяжесть поражения | Условная вероятность гибели людей при разрушении | | | |
|-------------------|--|---------|---------|--------|
| | полном | сильном | среднем | слабом |
| Смертельное | 0,6 | 0,49 | 0,09 | 0 |
| Тяжелые травмы | 0,37 | 0,34 | 0,1 | 0 |
| Легкие травмы | 0,03 | 0,17 | 0,2 | 0,05 |

Вероятностные критерии взрывоустойчивости зданий (сооружений) можно установить, исходя из анализа данных табл. 5, 6 и критериев приемлемого индивидуального риска гибели персонала — не более $1 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹ [2, 13]. В связи с этим риск разрушения здания (сооружения) может быть признан приемлемым, если частота воздействия взрыва на это здание (сооружение) с избыточным давлением во фронте ударной волны, при котором исключена возможность разрушения основных несущих и ограждающих конструкций здания (нарушение целостности сооружения), не превышает $1 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹.

Согласно табл. 5 предельное значение $\Delta P_{\text{ф}}$ для большинства производственных зданий находится в диапазоне 10–30 кПа, для сооружений (технологических объектов) — от 20–40 кПа (наземные трубопроводы, резервуары) до 400–800 кПа (подземные трубопроводы, коммуникации).

Учитывая положения п. 4.2.6 РД 03-418—01 [17], а также тот факт, что в данном случае многое определяется экономическими причинами, обосновывать критерии взрывоустойчивости зданий и сооружений целесообразно на стадии проектирования опасного производственного объекта с учетом его специфики.

Считаем целесообразным учесть полученные результаты при переработке ПБ 09-540—03.

Выводы

1. Проведено сравнение результатов расчетов последствий взрыва ТВС по российским нормативным методикам (РД 03-409—01, ПБ 09-540—03) с экспериментальными данными по распространению волны давления от взрыва водородовоздушной смеси, а также с расчетами по методике фирмы TNO (Нидерланды). Показано:

при одинаковых расстояниях значения избыточного

давления во фронте ударной волны, рассчитанные согласно РД 03-409—01 и по модели TNO, совпадают с точностью до 20 %. При этом полученные значения безопасных расстояний практически совпадают;

расчет последствий аварий с выбросами горючих газов по РД 03-409—01 может приводить к существенному уменьшению оценочных размеров зон разру-

шения (в 1,5 и более раз) по сравнению с ПБ 09-540—03.

2. Выполнен обзор критериев воздействия ударной волны на здания и сооружения, представлены рекомендации по оценке взрывоустойчивости, в том числе о проведении количественного анализа риска разрушения зданий и сооружений при аварийных взрывах.

Список литературы

1. *Федеральный закон* от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»// Рос. газ. — № 255 (5079). — 2009. — 31 дек.
2. *Федеральный закон* от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»// Рос. газ. — № 163 (4720). — 2008. — 1 авг.
3. *ПБ 09-540—03*. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. — Сер. 9. — Вып. 11. — М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2003.
4. *РД 03-409—01*. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей// Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. — Сер. 27. — Вып. 2. — М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.
5. *РД-03-26—2007*. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. — Сер. 27. — Вып. 6. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2007.
6. *Методика* определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах/ МЧС России: Введ. 10.07.2009. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
7. *ГОСТ Р 12.3.047—98*. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. — М.: Изд-во стандартов, 1998.
8. *СП 12.13130.2009*. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности/ МЧС России: Введ. 01.05.2009. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
9. *Beccantini A., Malczynski A., Studer E.* Comparison of TNT-Equivalency Approach, TNO Multi-Energy Approach and a CFD Approach in Investigating

Hemispheric Hydrogen-Air Vapour Cloud Explosions// 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh, 2007, 23-27th April.

10. *Программный комплекс* по расчету последствий аварий ТОКСИ+^{Risk}. URL: <http://safety.ru/software/toxi#risk> (дата обращения 05.09.2011).

11. *Methods for the calculation of physical effects CPR 14E. Part 2. Yellow Book*. — 3-rd edition. — TNO, 2005.

12. *Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 кн./ У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.: Пер. с англ.* — М.: Мир, 1986.

13. *СТО Газпром 2-2.3-400—2009*. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром»/ ОАО «Газпром»: Введ. 05.10.2009. — М.: ОАО «Газпром», 2009.

14. *Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учеб. пособие/ В.А. Котляревский, А.В. Виноградов, С.В. Еремин и др.* — Кн. 2. — М.: АСВ, 1996.

15. *Пособие* по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок/ АО «ЦНИИПромзданий». — М., 2000 г.

16. *А.М. Козлитин*. Вероятностные методы анализа последствий фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания, сооружения при аварийных ситуациях на предприятиях нефтегазовой отрасли// Междунар. науч. сб. СРО «Российская экологическая академия», ООО «Три А», 2005.

17. *РД 03-418 — 01*. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — Сер. 3. — Вып. 10. — М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.

risk@safety.ru