

Наука и техника

УДК 621.72:621.532.3.656.08

© Коллектив авторов, 2008

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ С ФАКТАМИ АВАРИЙ



С.И. Сумской,
канд. техн. наук
(АНО «Агентство исследований
промышленных рисков»)



К.В. Ефремов



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук



А.С. Софьин

(НТЦ «Промышленная безопасность»)

The article lays open basic principles of guidelines and software systems meant for evaluation of accidental emissions' consequences, developed by SCT «Industrial Safety» (RD-03-26—2007, Toxi-2, Toxi-3) as well as results of comparing calculation results with facts of the accidents.

Оценка последствий аварийных выбросов опасных веществ — один из этапов анализа риска аварий, выполняемого при проектировании, декларировании промышленной и пожарной безопасности. Наибольшая опасность аварийных выбросов связана с возможностью распространения (дрейфа) облаков на значительные расстояния, величина которых зависит от свойств веществ, условий выброса и состояния окружающей среды.

Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (РД-03-26—2007) [1], основанные на предыдущей версии Методики оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ («Токси-3») [2, 3], вместе с ранее разработанными методиками «Токси-1» [4] и «Токси-2» [5] — результат развития методических подходов НТЦ «Промышленная безопасность» к оценке последствий аварийных ситуаций.

В РД-03-26—2007 учитывается ряд особенностей распространения в атмосфере выбросов «тяжелого» газа, т.е. выбросов газообразных (или капельно-газообразных) сред, плотность которых больше плотности воздуха. Большинство аварийных выбросов на типовых химически опасных производствах действительно имеют плотность больше плотности воздуха, что может быть обусловлено высокой молекулярной массой выброшенных при

аварии веществ, их пониженной температурой, наличием капельных включений в выбросе и протеканием реакций, результатом которых является образование «тяжелых» газов.

Методика «Токси-2» относится к так называемым гауссовским моделям, так как для определения распределения концентрации веществ при рассеивании в атмосфере использует закон Гаусса. Гауссовские модели не учитывают силу тяжести и позволяют достаточно точно рассчитывать лишь выбросы нейтральной плавучести. Для выбросов «легких» газов, т.е. газов с плотностью меньше, чем плотность воздуха, методика «Токси-2» тоже применима, однако результаты расчетов по ней следует принимать как консервативную (завышенную) оценку, поскольку «легкие» газы, в отличие от газов нейтральной плавучести, будут подниматься вверх и рассеиваться с более высокой отметки, что приведет к более низким концентрациям у поверхности земли.

Объединенные в программный комплекс «ТОКСИ+»¹ методики РД-03-26—2007 и «Токси-2» позволяют рассчитать выброс любой плотности (т.е. выброс «легкого», «нейтральной плавучести» или «тяжелого» газа), в том числе и с целью оценить последствия взрывных превращений дрейфующих

¹ Описание и демо-версию программного комплекса см. на сайте www.safety.ru.

облаков топливно-воздушных смесей (ТВС) по методике РД 03-409—01 [2].

Для оценки последствий взрывных превращений необходимо учитывать не только его тип (горение (детонация) и массу топлива во взрывоопасных пределах [2], но и расстояние дрейфа, на котором в облаке могут сохраняться взрывоопасные концентрации. Общие схемы дрейфа облаков ТВС и параметры зон существования различных поражающих факторов приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлена схема дрейфа первичного и вторичного облаков ТВС при аварийном выбросе вскипающих жидкостей, в том числе сжиженного газа, на рис. 2 — схема распространения вторичного облака ТВС при аварийном выбросе и испарении из пролива стабильных жидкостей (нефть, бензин, дизельное топливо и т.д.).

При расчетах зон поражения предполагается, что максимальные значения дальности дрейфа взрывоопасного облака (расстояние L на рис. 1 и 2) составляют расстояние, на котором облако рассеивается до концентрации, равной половине нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ). Такой критерий был принят, так как в облаке наблюдается сильная неоднородность концентрации и поэтому при средней концентрации в облаке менее НКПВ, в отдельных местах могут наблюдаться области с концентрацией выше НКПВ, т.е. возможно воспламенение. Кроме того, такой критерий учитывает перемещение пламени в область с изначально более низкой концентрацией топлива как за

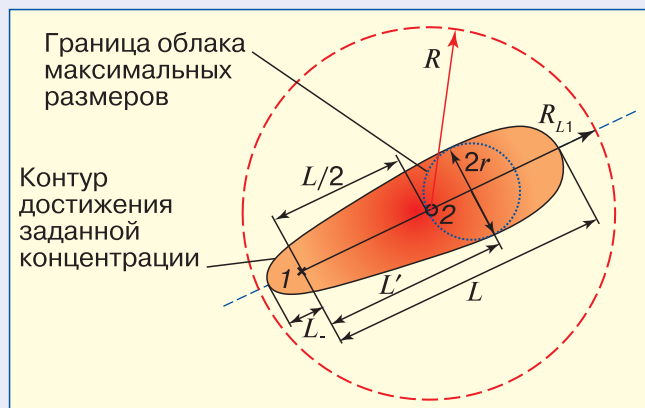


Рис. 1. Схема распространения первичного и вторичного облаков ТВС при аварийном выбросе вскипающих жидкостей:

1 — источник выброса опасного вещества; 2 — источник иницирования взрывного превращения; L — максимальная дальность дрейфа облака ТВС в направлении ветра; L_+ — максимальное расстояние распространения облака ТВС в направлении против ветра; L' — расстояние от места выброса, на котором достигается максимальная ширина облака; $2r$ — ширина облака ТВС; R — граница зоны избыточного давления при взрыве ТВС; R_{L1} — максимальный размер (от источника выброса) зоны поражения при взрыве с учетом дрейфа облака ТВС

счет расширения продуктов сгорания, так и за счет переноса в поле ветра уже горящих объемов.

Также, предполагается, что иницирование взрывного превращения происходит в точке на оси выброса на расстоянии $L/2$ от места выброса.

В результате максимальный размер зоны поражения при взрыве с учетом дрейфа облака ТВС R_{L1} (R_{L2}), радиус зоны избыточного давления при взрыве R и максимальные размеры дрейфа L , r и расстояние достижения максимальной ширины облака L' связаны следующими соотношениями:

$$R_{L1} = R' + L/2;$$

$$R_{L2} = R' + L/2 + l,$$

где $R' = \max\{R; [r^2 + (L' - L/2)^2]^{1/2}; L/2\}$, а l — характеристика пролива. Приведенное выражение для R' учитывает как возможность достижения максимального размера зоны поражения за счет действия взрывной волны (в этом случае $R' = R$), так и за счет распространения пламени в облаке: в этом случае $R' = \max\{[r^2 + (L' - L/2)^2]^{1/2}; L/2\}$. При этом величина $[r^2 + (L' - L/2)^2]^{1/2}$ соответствует ситуации, когда максимальный размер зоны поражения определяется поперечной шириной зоны дрейфа, а величина $L/2$ соответствует ситуации, когда максимальный размер зоны поражения определяется протяженностью зоны дрейфа.

Весомое подтверждение любой методики — совпадение прогнозируемых результатов с фактами аварий и экспериментов. «Токси-3» (РД-03-26—2007) неоднократно верифицировалась по нескольким экспе-

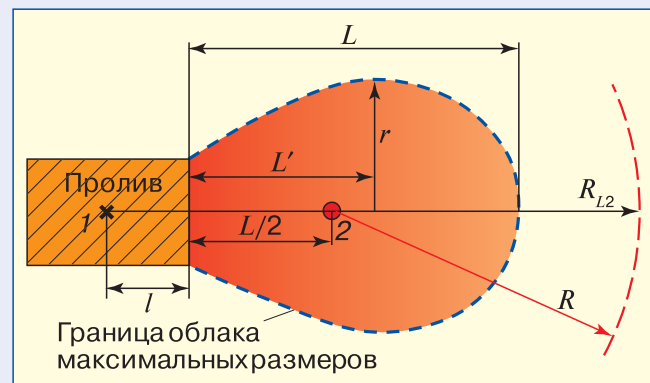


Рис. 2. Схема распространения вторичного облака ТВС при аварийном выбросе и испарении из пролива стабильных жидкостей:

1 — источник выброса опасного вещества; 2 — источник иницирования ТВС; L — максимальная дальность дрейфа облака ТВС в направлении ветра; L' — расстояние, на котором достигается максимальная ширина облака; r — полуширина облака ТВС; R — граница зоны избыточного давления при взрыве ТВС; R_{L2} — максимальный размер зоны поражения при взрыве с учетом дрейфа облака ТВС (от источника выброса)

риментальным сериям [3, 6, 7, 8]. Ниже представлены результаты сравнительного анализа расчетов с данными происшедших аварий. Такой анализ позволяет существенно расширить верификационный диапазон, поскольку в реальности происходили аварии, которые в экспериментах на сегодняшний день смоделированы быть не могут. Например, в экспериментах крайне редко бывают задействованы объемы опасных веществ более 10 т, в то время как в реальных аварийных ситуациях — это сотни и даже тысячи тонн.

Однако использование данных с описанием аварий для верификации методик содержит определенные трудности, так как, в отличие от экспериментов, данные об авариях отличаются более высокой степенью неопределенности информации об условиях их развития (метеословия, размер дефектного отверстия, масса выброса), особенно если авария сопровождалась взрывом. В связи с этим при отборе аварий для сравнения с расчетами учитывались как масштаб аварии, так и достоверность имеющихся о ней данных.

Авария при обращении с аммиаком 13.07.73, Потчеструм (ЮАР)

Информация об этой аварии подробно представлена в [9], основные последствия аварии описаны в [10].

Авария произошла на заводе по выпуску удобрений (самое большое число погибших за всю историю аварий на объектах с аммиаком). Ее причиной стало крупное разрушение горизонтального цилиндрического резервуара со сжиженным аммиаком, хранившемся под давлением при температуре 15 °С, в результате отрыва торцевой части. Практически мгновенно в горизонтальном направлении из резервуара было выброшено 38 т аммиака, под выброс попали близлежащие резервуары.

Всего в результате аварии погибли 18 человек. Из них двое скончались непосредственно на месте аварии. Остальные 16

умерли спустя некоторое время вследствие полученных отравлений.

На рис. 3 представлена схема расположения пострадавших, в том числе погибших непосредственно на месте аварии, а также пути выхода людей с места аварии.

Информация о метеословиях, в которых протекала авария, весьма ограничена. В литературе сообщается, что после аварии наблюдался «легкий бриз».

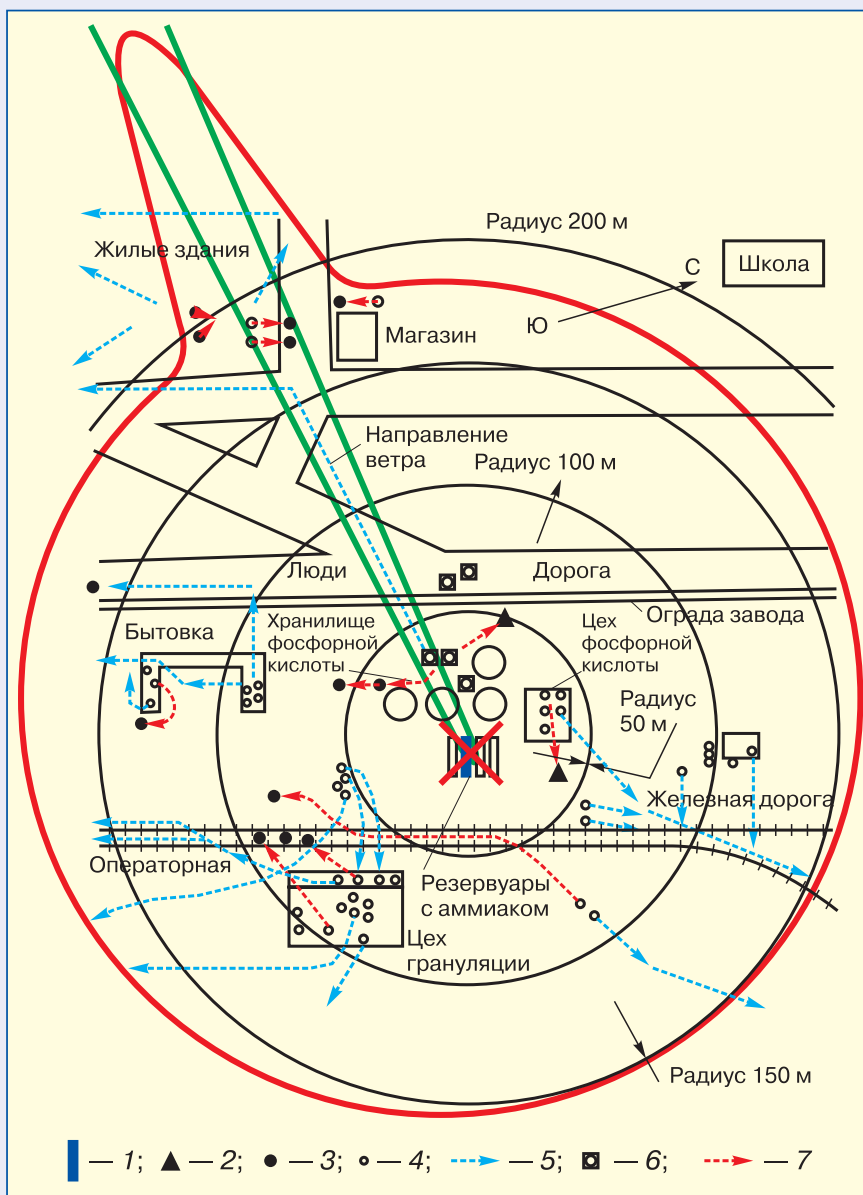


Рис. 3. Схема расположения пострадавших, в том числе погибших непосредственно на месте аварии в Потчеструме (ЮАР, 13.07.73). Красная линия — границы зоны смертельного поражения согласно расчетам по методике «Токси-3» (РД-03-26—2007), зеленая — по «Токси-2»:

1 — разрушенный резервуар; 2 — местоположение людей, найденных мертвыми; 3 — местоположение людей, пытавшихся выйти из зоны поражения, но впоследствии умерших; 4 — местоположение людей во время аварии; 5 — маршруты движения выживших; 6 — местоположение людей, не пытавшихся выйти из зоны поражения, но впоследствии умерших; 7 — маршруты движения погибших

Отмечается, что на месте аварии не наблюдалось пролива жидкой фазы. На начальной стадии радиус облака достигал 150 м, а высота выброса — 20 м. Интересно утверждение некоторых пострадавших, что дышать у земли было легче, поскольку воздух там содержал меньше аммиака.

Начальные данные, использовавшиеся при моделировании

Для моделирования этой аварии с помощью методики «Токси-3» (РД-03-26—2007) был выбран сценарий № 3 — полное мгновенное разрушение емкости с жидким аммиаком. Аммиак находится в емкости при температуре 15 °С и соответствующем этой температуре давлении насыщенных паров. Масса жидкой фазы в резервуаре была принята равной 38 т. Поскольку данные об обваловании отсутствуют, предполагалось, что пролив происходил на неограниченную поверхность слоем 5 см. Подстилающая поверхность — бетон. Характерный размер шероховатости был принят равным 0,55 м, что соответствует местности типа «Центры небольших городов» [1].

В качестве метеоусловий были выбраны скорость ветра 1 м/с на высоте 10 м и класс устойчивости атмосферы — *F*. Такой выбор обусловлен, с одной стороны, фактом упоминания «легкого бриза», а с другой — последствиями аварии. Как уже отмечалось, наблюдались большие зоны поражения. Этот факт заставляет предположить, что авария протекала в наихудших условиях, которым соответствует скорость 1 м/с и класс устойчивости атмосферы *F*. Время экспозиции — 30 мин.

Сравнение результатов расчетов с последствиями аварии

В результате расчета по методике «Токси-3» (РД-03-26—2007) с использованием вышеприведенных начальных данных определена зона смертельного поражения. Эта зона показана на рис. 3. Размеры зоны смертельного поражения составляют 329 м в направлении ветра, 149 м в направлении против ветра и 343 м в самом широком месте.

Полученные результаты соотносятся с имеющимися данными по расположению людей, погибших в ходе аварии. Действительно, как видно из рис. 3, все погибшие в ходе аварии, находятся в предсказанной по методике «Токси-3» (РД-03-26—2007) зоне смертельного поражения. И по факту аварии, и согласно расчетам зона смертельного поражения близка по форме к кругу, несколько смещенному от места выброса в направлении ветра. Это означает, что гибель людей может произойти не только в направлении ветра, как иногда ошибочно полагается, но и в направлении против ветра, и в поперечном к ветру направлении. Такая форма зоны поражения

обусловлена, прежде всего, гравитационным растеканием аммиачно-воздушного облака в первые минуты после выброса, что является типичной ситуацией для выбросов «тяжелого» газа, как известно, аммиачно-воздушные смеси в присутствии капельных включений аммиака образуют смеси с плотностью большей, чем плотность воздуха.

Общая зона поражения, и это хорошо видно из рис. 3, складывается за счет прохождения двух облаков: первичного и вторичного, последнее образуется при испарении пролива. От первичного облака формируется основной круг поражения. В зоне поражения вторичному облаку соответствует выступ в направлении ветра на круговом контуре зоны поражения.

Возникает вопрос: насколько сильно неопределенность используемых исходных данных может повлиять на конечные результаты расчетов размеров зон поражения? В частности, насколько можно быть уверенными, что получены максимальные зоны поражения? Рассмотрим влияние некоторых факторов на размеры зоны поражения. Расчет, который рассматривался выше, будем считать «базовым вариантом».

На рис. 3 также приведена и зона смертельного поражения согласно методике «Токси-2». Видно, что результаты расчета существенно отличаются от того, что наблюдалось в действительности, а также от результатов расчета по «Токси-3» (РД-03-26—2007): протяженность зоны поражения больше, а поперечный размер существенно меньше.

На рис. 4 в плане представлены размеры зон поражения при разных классах устойчивости атмосферы: *F* (*a-g*), *A* (*d, e*) и *D* (*ж, и*), времени экспозиции (10–60 мин) и скорости ветра (1–10 м/с). Место выброса располагается в точке с координатами (0,0). Ветер направлен слева направо по оси *x*.

Видно, что в целом зоны поражения во всех направлениях при неустойчивой стратификации атмосферы (*A, D*) меньше, чем при устойчивой (*F*). Это объясняется тем, что, во-первых, при неустойчивой стратификации условия для рассеяния выброса лучше, чем при устойчивой, и, во-вторых, тем, что скорость движения выброса в приземном слое при неустойчивой стратификации выше, чем при устойчивой. Соответственно, более интенсивное рассеяние приводит к низким концентрациям. Более быстрое перемещение облака также уменьшает распространение облака в направлении против ветра. Оба эти фактора, в сочетании, приводят к уменьшению токсодоз и, как следствие, к уменьшению зон поражения. При других классах устойчивости атмосферы размеры зон поражения также будут меньше, чем при выбранном в «базовом варианте» классе *F*. Таким образом, проведенный расчет — «базовый вариант» — имеет консерватив-

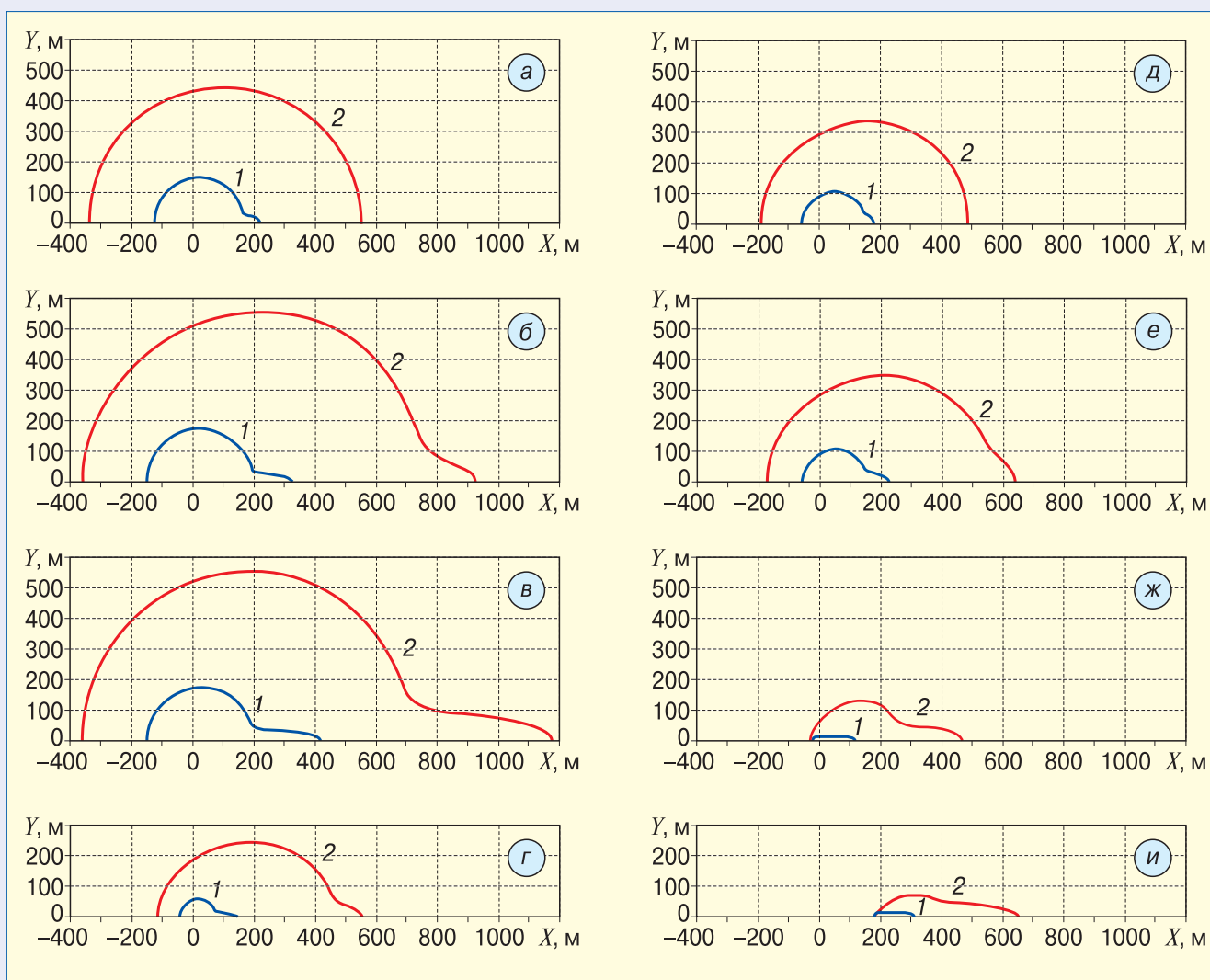


Рис. 4. Размеры зон смертельного 1 и порогового 2 поражения на поверхности земли при разных условиях устойчивости атмосферы, времени экспозиции и скорости ветра:

а — класс устойчивости F , 1 м/с, 10 мин; б — класс устойчивости F , 1 м/с, 30 мин; в — класс устойчивости F , 1 м/с, 60 мин; г — класс устойчивости F , 3 м/с, 30 мин; д — класс устойчивости A , 1 м/с, 10 мин; е — класс устойчивости A , 1 м/с, 30 мин; ж — класс устойчивости D , 5 м/с, 30 мин; и — класс устойчивости D , 10 м/с, 30 мин

ный характер, т.е. при классе устойчивости атмосферы F , действительно будут наблюдаться максимальные размеры зон поражения.

Размеры зон поражения при скорости ветра 1 м/с и классе устойчивости F для времени экспозиции — 10, 30 и 60 мин представлены на рис. 4, а–в. Отметим, что зоны поражения первичным облаком при 30- и 60-минутной экспозиции практически совпадают (см. рис. 4, б, в). Хорошо видна динамика увеличения размера зоны поражения от вторичного облака для большего времени экспозиции (см. рис. 4, а, в), а также наблюдается рост выступа в направлении ветра (см. рис. 4, а–в). Аналогичная динамика наблюдается и для класса A (см. рис. 4, д, е). Причина этого очевидна: при постоянной концентрации в некоторой точке вторичного облака шлейфа, увеличение времени экспозиции ведет к увеличению ингаляционной токсодозы и, как след-

ствие, к увеличению размеров зоны поражения. Время же набора ингаляционной дозы в зоне поражения первичным облаком ограничено временем прохождения этого облака, и увеличение времени экспозиции уже не приводит к увеличению токсодоз в отдельных точках и размеров зон поражения в целом.

Выбранное время экспозиции — 30 мин — позволяет достаточно консервативно оценивать зоны поражения, т.е. получать их размеры вблизи верхней границы возможных величин.

Рассмотрим, как скорость ветра влияет на размеры зон поражения. При значительном изменении скорости ветра может меняться и класс устойчивости атмосферы. Поэтому увеличение скорости ветра надо рассматривать и с учетом изменения состояния атмосферы. Видно, что увеличение скорости ветра сопровождается существен-

ным уменьшением размеров зон поражения как для класса F (см. рис. 4, б, г), так и для класса D (см. рис. 4, ж, и). И с точки зрения выбора скорости ветра консервативность подхода соблюдена.

Результаты варьирования основных параметров, определяющих размер зоны поражения, показывают, что в «базовом варианте» действительно использовались данные, соответствующие наилучшим условиям. Можно утверждать, что зона поражения (см. рис. 3) действительно получена в обоснованно консервативных предположениях и ее можно рассматривать как максимально возможную при конкретных условиях протекания аварии.

Авария при обращении с хлором 06.01.05, Грэнитвилль (США, штат Южная Каролина)

Информация об аварии подробно представлена в [11]. Она освещалась средствами массовой информации.

Глубокой ночью в промзоне небольшого городка при столкновении двух поездов на железной дороге произошло разрушение цистерны, содержащей 82 т сжиженного хлора. Сцепкой соседнего вагона было пробито отверстие около 90 см в длину и примерно 15 см в ширину.

Погибли девять человек: машинист локомотива, местный житель, водитель грузовика и шесть рабочих расположенных поблизости предприятий. За медицинской помощью обратились 554 человека. Среди пожарных, сразу прибывших на место аварии, было шесть пострадавших, один из которых провел в больнице несколько дней. Также пострадали два представителя шерифа, приехавшие на место аварии в первые минуты после столкновения. Впоследствии в радиусе 1,5 км было полностью эвакуировано местное население (5400 человек). В радиусе 300 м был установлен режим, при котором люди допускались туда только в спецодежде. Ущерб от аварии составил 6,9 млн. долл. США. В районе аварии были обнаружены трупы животных и рыб.

В локомотиве поезда находились два человека, один из них погиб, он умер в больнице спустя несколько часов, причем сразу после аварии оба железнодорожника смогли самостоятельно выйти с места аварии и лишь пройдя около 100 м упали на землю, где их подобрала рабочая бригада близлежащих фабрик и отвезли в больницу. Многие люди, находившиеся вблизи места аварии, предприняли попытку выйти из облака и оказались среди выживших. Например, работница, дежурившая на одной из фабрик и находившаяся в 60–70 м от места выброса. Она сразу же позвонила в службу спасения, а спустя еще 1 мин почувствовала запах хлора и вышла из зоны поражения. Также остались в живых пожарные и представители шерифа, приехавшие на ме-

сто аварии, спустя 5 мин после столкновения, но через 3 мин они вынуждены были удалиться из-за возникших проблем с дыханием.

Согласно результатам расследования [11] все погибшие находились в хлорном облаке около 10 мин, восемь из девяти погибших — внутри помещений.

Пострадавших могло быть и больше, но часть людей спаслась, выйдя из зоны поражения либо забравшись на крыши. Ослаблению последствий способствовало и то, что уже через 10 мин было передано оповещение для населения — плотно закрыть помещения. Впоследствии оно повторялось. Меньше чем за 20 мин в радиусе 1,5 км были перекрыты дороги к месту аварии. Сравнительно быстрое начало спасательной операции и своевременное оказание медицинской помощи также снизило количество жертв. Уже через несколько минут после аварии пожарные и представители шерифа начали выводить людей из зоны поражения. А спустя час спасатели в защитных костюмах подошли к месту аварии и начали вывод оставшихся там людей. Так, был спасен человек, заблокированный в автомобиле под деревьями, упавшими при крушении. Освобождены люди, запертые в помещениях близлежащих фабрик, их успешно эвакуировали спустя более 2 ч после аварии.

Облако хлора, по сообщению очевидцев, было низкостелющимся и вытянутым на север (по направлению ветра) на 825 м, на юг (против ветра) на 300 м и в боковом направлении на запад и восток на 330 м.

Согласно показаниям метеостанции, расположенной на расстоянии 27 км от Грэнитвилля, температура воздуха составляла 13 °С, ветер дул с юго-юго-запада, его скорость составляла около 2–3 м/с. Кроме того, очевидцы отмечали, что на месте аварии ветер практически отсутствовал.

Согласно [11] хлор при транспортировании находился при температуре –3 °С. При разгерметизации цистерны произошло его вскипание, часть жидкого хлора пролилась на подстилающую поверхность, часть в охлажденном виде осталась в цистерне. По различным оценкам, в цистерне осталось до половины содержимого, хлор находился внутри цистерны еще несколько дней после аварии, через отверстие происходила его эмиссия в окружающую среду.

Начальные данные, использовавшиеся при моделировании

Для моделирования этой аварии, учитывая существенный характер разрушения, был выбран сценарий № 3 — полное мгновенное разрушение цистерны с жидким хлором. Предполагалось, что на момент аварии хлор находился в емкости при

температуре -3°C . Масса жидкой фазы в цистерне была принята равной 82 т. Предполагалось, что пролив происходил на неограниченную поверхность слоем 5 см. Однако из общего пролива вычиталась масса хлора, остававшаяся, по оценкам, в цистерне, — 41 т. Характерный размер шероховатости был принят равным 0,55 м, что соответствует местности типа «Центры небольших городов».

В качестве метеоусловий, исходя из метеоданных [11] и тех соображений, что выброс происходил ночью при незначительном ветре, выбраны скорость ветра 1–2 м/с и класс устойчивости F . В качестве направления ветра было выбрано направление на север-северо-восток.

Температура окружающей среды, согласно имеющимся метеоданным, принята равной 13°C . В качестве подстилающей поверхности был выбран песок.

Время экспозиции — 10 мин, так как сравнение расчетной зоны смертельного поражения и зоны смертельных поражений, наблюдавшихся на практике, было корректно: согласно [11] смертельное поражение получили люди, находившиеся вблизи места аварии около 10 мин.

Сравнение расчетов с последствиями аварии

Схема расположения погибших и расчетные зоны смертельного поражения при разной скорости ветра представлены на рис. 5. Приведены результаты для двух скоростей ветра 1 и 2 м/с (рис. 5, а, б). Видно, что зона смертельного поражения согласно «Токси-3» (РД-03-26—2007) при 1 м/с охватывает всех погибших, при скорости же 2 м/с часть погибших в направлении против ветра не попадает в зону смертельного поражения. Однако их местоположение находится сравнительно недалеко от границы смертельных токсодоз. В целом в условиях отсутствия точной информации о скорости ветра на месте аварии данные результаты можно считать вполне удовлетворительными. В отношении же расположения границы зоны смертельного поражения в направлении против ветра можно добавить следующее: рельеф места аварии имел незначительный спуск в южном и юго-западном направлениях, соответственно в этих направлениях существовали и условия способствующие растеканию облака, что и могло увеличить зону поражения в этом направлении. Таким образом, неучет в рамках «Токси-3» (РД-03-26—2007) рельефа мог несколько уменьшить размер зоны поражения в направлении спуска. Такие расхождения в условиях отсутствия точных исходных данных вполне приемлемы.

На рис. 5 также приведены контуры зоны поражения, рассчитанной по методике «Токси-2». Как и при анализе аварии в ЮАР, зона смертельного поражения и по форме и по размерам получается точ-



Рис. 5. Схема расположения погибших при аварии в Грэнитвилле (США, 06.01.05) и расчетные зоны смертельного поражения при разной скорости ветра:

а — 1 м/с; б — 2 м/с; 1 — границы зоны смертельного поражения согласно «Токси-3» (РД-03-26—2007); 2 — согласно «Токси-2»

нее при расчете по методикам, учитывающим силу тяжести, чем по простейшим и достаточно широко распространенным гауссовским моделям.

Авария при обращении с пропаном 09.12.70, Порт-Хадсон (США, штат Миссури)

Информация об этой аварии подробно представлена в отчетах [12, 13], ее основные последствия также описаны в [10, 14].

В результате разрыва трубопровода $D_y = 200$ мм, по которому транспортировался жидкий пропан под давлением 6 МПа, произошли выброс и взрыв облака. Между моментом разрушения и собственно взрывом прошло 24 мин. Считается, что взрыв облака происходил в детонационно-подобном режиме, т.е. скорость волны горения составляла от нескольких сотен метров в секунду. Некоторые исследователи полагают, что имела место детонация.

Последнее маловероятно, так как характер разрушений не подтверждает наличие избыточного давления в облаке. Объем выброса на момент взрыва составил не менее 60 т.

Считается, что взрыв облака был инициирован искровым разрядом термостата холодильной установки, расположенной на пути дрейфа облака. Установка находилась в здании из бетонных блоков (300 м от места выброса по направлению ветра), куда постепенно проникал пропан. По характеру разрушения можно сделать вывод, что внутри помещения произошел взрыв. Это означает, что, скорее всего, инициирование дрейфующего облака происходило в две стадии: на первой от достаточно слабой искры происходит взрыв в замкнутом пространстве, а потом этим взрывом инициируется основная масса топливно-воздушной смеси.

Аварию в Порт-Хадсоне, наряду с аварией под Уфой (СССР, 1987 г. [15]), можно считать крупнейшей среди аварий, связанных с выбросом сжиженных газов.

Погибших в ходе аварии не было, поскольку ее район являлся малонаселенным, а задержка в 24 мин между началом выброса и взрывом позволила провести эвакуацию. Пострадавших различной степени тяжести — 10 человек. Разрушения зданий наблюдались в радиусе нескольких километров. Свидетели отмечали наличие на месте выброса вертикальной струи высотой 15–25 м.

Начальные данные, использовавшиеся при моделировании

Для моделирования этой аварии был выбран сценарий № 4 — частичное разрушение оборудования с жидкой фазой. Поскольку детальные технические характеристики трубопровода неизвестны, то моделировалась ситуация истечения жидкого пропана из емкости с присоединенным трубопроводом. Причем в качестве ключевого параметра для согласования исходных данных при моделировании с параметрами аварии был выбран расход из емкости, в расчетах он составлял 48 кг/с, что соответствует информации о реальной аварийной ситуации, когда 70 т было выброшено в атмосферу за 24 мин.

Согласно [14] были выбраны следующие метеорологические условия: ветер 2,4 м/с, класс устойчивости атмосферы F, температура окружающей среды и пропана в трубопроводе 1 °С. Скорость ветра была принята постоянной по высоте, а шероховатость подстилающей поверхности — равной 0,25 м, что соответствует типу местности «Ровная поверхность с отдельно стоящими деревьями». В качестве поверхности, на которую происходит пролив, выбран песок.

Сравнение расчетов с последствиями аварии

На рис. 6 показаны зоны взрывоопасных концентраций: зоны достижения верхнего concentra-

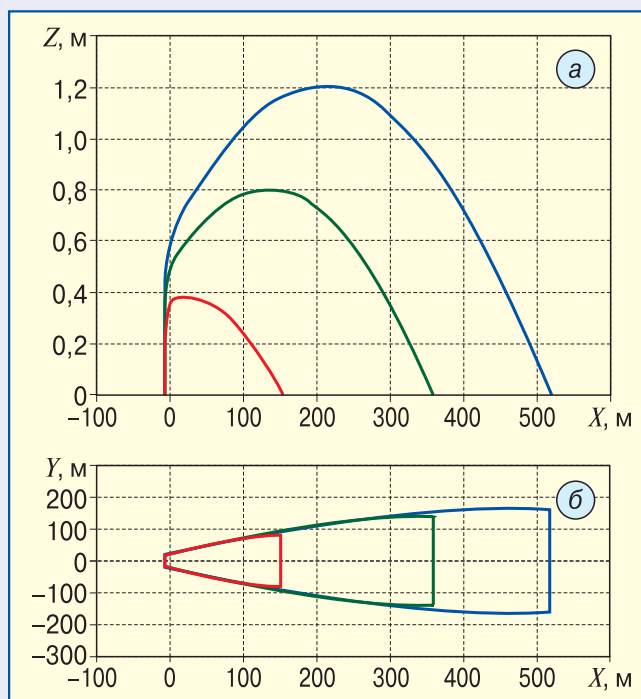


Рис. 6. Рассчитанные в соответствии с «Токси-3» (РД-03-26—2007) зоны взрывоопасных концентраций при аварии в Порт-Хадсон (США, 09.12.70):

а — в вертикальном сечении вдоль ветра; *б* — на поверхности земли

ционного предела воспламенения (ВКПВ) — красная линия, НКПВ — зеленая, половины величины от НКПВ — синяя линия. Протяженность L этих зон составляет соответственно 151, 361 и 517 м; полуширина r — 86, 134 и 167 м, а высота — 0,4, 0,8 и 1,2 м. Источник инициирования (электрооборудование холодильной установки) попадает в зону вблизи НКПВ.

Отметим, что полученные результаты значительно отличаются от результатов моделирования этой аварии, например в [13]. Согласно [13] размеры зоны НКПВ составляют 1450 м в длину, 96 м в ширину и 22 м в высоту. Представляется, что это ошибочные результаты, поскольку в расчетах [13] использовалась гауссовская модель, не учитывающая действие силы тяжести.

К сожалению, сведения о последствиях этой аварии достаточно ограничены, к наиболее достоверным можно отнести лишь данные о характере последствий взрыва. По данным [10], тротиловый эквивалент взрыва в Порт-Хадсоне составил 45–64 т. Согласно расчету по «ТОКСИ+» масса пропана во взрывоопасных пределах составляет около 5 т, т.е. с учетом разницы энергии, выделяющейся при взрыве пропана и тротила, можно констатировать хорошее совпадение по тротиловому эквиваленту.

В настоящее время в НТЦ «Промышленная безопасность» разрабатывается программный комплекс

«ТОКСИ+^{RISK}» для работ по количественной оценке риска. «ТОКСИ+^{RISK}» позволит проводить расчеты не только зон поражения по всем методикам, входящим в комплекс «ТОКСИ+», но и рассчитывать индивидуальный, потенциальный, коллективный и социальный риски (F/N -кривые).

Список литературы

1. РД-03-26—2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. — Сер. 27. — Вып. 6 / Колл. авт. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2008. — 124 с.
2. РД 03-409—01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями): Сб. документов: Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. — Сер. 27. — Вып. 2 / Колл. авт. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. — 208 с.
3. Пчельников А.В., Лисанов М.В., Сумской С.И. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере // Российский химический журнал. — 2005. — Т. XLIX. — № 4. — С. 18–28.
4. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-1»). — 1993. — 19 с.
5. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2»): Сб. документов: Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. — Сер. 27. — Вып. 2 / Колл. авт. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. — 208 с.
6. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели «тяжелого» газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. — № 9. — 2004. — С. 46–52.
7. Верификация методик для расчета рассеяния токсических выбросов / С.А. Губин, И.В. Маклашова, С.М. Лыков и др. // Химическая промышленность. — 1999. — № 10. — С. 58(662)–66(670).
8. Верификация методик оценки последствий аварийных выбросов газа от источников продолжительного действия / А.В. Пчельников, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 28–35.
9. Lonsdale H. Ammonia tank failure — South Africa. CEP Technical Manual. — Vol. 17. — A.IchemE. New York, 1975.
10. Маршалл В. Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989. — 672 с.
11. Collision of Norfolk Southern Freight Train 192 With Standing Norfolk Southern Local Train P22 With Subsequent Hazardous Materials Release at Graniteville, South Carolina January 6, 2005. NTSB/RAR-05/04 PB2005-916304 Notation 7710A 490, 2005.
12. Phillips Pipeline Company, Propane Gas Explosion, Franklin County, Missouri, December 9, 1970. NTSB/PAR-72-01 PB-209876, 1972.
13. Burgess D.S., Zabetakis M.G. Detonation of a flammable cloud following a propane pipeline break. — US Bureau of Mines, R.I.7752, 1972.
14. Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Control. — Vol. 3. — Oxford-Butterworth-Hinemann, 1996.
15. Makhviladze G.M., Yakush S.E. Proc. of the 29th Int. Symp. on Comb. — 2002. — P. 195–210.

УДК 628.517.2

© В.С. Шароглазов, 2008

ГЛУШИТЕЛИ ШУМА ДЛЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ



В.С. Шароглазов
(г. Кемерово)

In ventilation systems, to damp sound propagated along air ducts from the fan as well as from their cymas, various sound dampers are used. Most efficient — acoustic combined sound damper.

При эксплуатации вентиляционного оборудования применяют комплекс мероприятий по шумопоглощению. В настоящее время для снижения аэродинамического шума в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в нашей стране и за рубежом широко используются пластинчатые, трубчатые и канальные глушители. Они просты в изготовлении, приемлемы по габаритам, обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, обеспечивают

существенное снижение звуковой мощности, распространяемой в воздуховодах в широком диапазоне частот.

Эти глушители относятся к абсорбционному типу. Снижение шума происходит благодаря пористому звукопоглощающему материалу (ЗПМ). В статье рассматривается один из современных ЗПМ — маты из базальтового супертонкого полотна (плотность 12,6 кг/м³). Защитное покрытие ЗПМ — стеклоткань ЭЗ-100 в прозрачном для звука кожухе из оцинкованной стали толщиной 0,7–1 мм с отверстиями $D = 10$ мм (20 % перфорации). Глушители должны применяться даже при работе ра-