

# Анализ риска

УДК 614.8:(622.323+658.345)

© Коллектив авторов, 2007

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ АВАРИИ НА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

*Н.И. АЗАРОВ, канд. техн. наук, О.В. ДАВИДЮК, Н.В. КОШОВЕЦ, канд. техн. наук (ЗАО «Северодонецкий ОРГХИМ»), М.В. ЛИСАНОВ, д-р техн. наук (НТЦ «Промышленная безопасность»)*

**В** статье проанализированы вопросы каскадного развития аварии с выбросом опасных веществ. На основе зарубежных и отечественных данных рассмотрены условия инициирования каскадного развития аварии воздействием теплового излучения огненного шара.

Обоснование принятых мер по предупреждению крупных аварий и катастроф на пожаровзрывоопасных производственных объектах связано с необходимостью анализа возможности каскадного развития аварии.

Каскадное развитие аварии (или «эффект домино» по зарубежной терминологии) — это неблагоприятный сценарий развития аварийной ситуации, при котором (вследствие несовершенства систем защиты и (или) неверных действий персонала) возможен выход поражающих факторов аварии за пределы аварийного блока, оборудования или объекта и вовлечение опасного вещества, находящегося в расположенном рядом неаварийном оборудовании, в последующую стадию развития аварии.

«Эффект домино» характеризуется смещением спектра возможных сценариев аварий в сторону наиболее неблагоприятных факторов и явлений, а именно: огненный шар, загазованность или дрейф с последующим взрывом облака большой массы топливно-воздушной смеси, дрейф облака токсичного вещества значительной массы.

В странах ЕЭС обязательность учета «эффекта домино» отражена на законодательном уровне в 1996 г. Директивой Севезо II о предотвращении крупных аварий [1]. Для тех предприятий, на которых, по мнению надзорных органов, возможен «эффект домино», обязательным условием служит учет вида и последствий таких аварий с отражением их в программах предотвращения крупных аварий, в системах управления безопасностью, в Safety Report (Отчет о безопасности — аналог деклараций промышленной безопасности) и в планах ликвидации аварии.

Аварии с «эффектом домино» исследовались несколькими зарубежными специалистами: Delvo-

salle<sup>1</sup> 1996, Pettit<sup>2</sup> et al., Bagster<sup>3</sup> and Pitblado, Scilly<sup>4</sup> and Crowther, Khan<sup>5</sup> and Abbasi, 1999, Kourniotis<sup>6</sup> et al., Jakomeit<sup>7</sup>. Примеры каскадного развития аварии изложены в табл. 1.

Delvosalle проанализировал свыше 40 аварий с «эффектом домино», происшедших с 1944 по 1994 г. Результаты исследований Delvosalle частоты реализации «эффекта домино» от вида оборудования приведены в табл. 2.

В работе Kourniotis представлены результаты статистической обработки данных об авариях, которые получили развитие с «эффектом домино». Специалистами исследована зависимость между частотой аварий с «эффектом домино» и видом опасного вещества. Результаты исследований приведены в табл. 3, в скобках дана доля от общего количества по данному веществу.

В работе Jakomeit приведены результаты исследований зависимости частоты развития аварии с «эффектом домино», которые составили от пространственного фактора (близость размещения оборудования на площадке) 95 %, количества высвободившегося опасного вещества — 52 % и вида вещества — 81 % (50 % — сжиженный нефтяной газ, 4 % — другие горючие газы, 27 % — горючие и легко воспламеняющиеся жидкости).

По данным зарубежных специалистов можно заключить, что аварии получают свое развитие с «эф-

<sup>1</sup> Delvosalle, C. 1996: Development of a methodology for the identification of potential domino effects based on a analysis of past accidents. Dr. ir. Christian DEL VOSALLE, Paper presented at the First Eur. Symp. on Domino Effect, Leuven, Sept. 1996.

<sup>2</sup> Pettit, G.N., R.R. Schumacher and L.A. Seeley: Evaluation the probability of major hazardous incidents as a result of escalation events, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 6, 37, 1993.

<sup>3</sup> Bagster, D.F. and R.M. Pitblado: The estimation of domino incident frequencies — an approach, Process Safety Environ., 69 B, 196, 1991.

<sup>4</sup> Scilly, N.F. and J.H. Crowther: Methodology for predicting domino effects from pressure vessel fragmentation, Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process Safety, 1992.

<sup>5</sup> Khan, F.I. and S.A. Abbasi, 1999: Major Accidents in Process Industries and an Analysis of Causes and Consequences, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 1999.

<sup>6</sup> Kourniotis, S.P., C.T. Kiranoudis, N.C. Markatos: Statistical Analysis of Domino Chemical Accidents. Journal of Hazardous Materials, 71, 2000.

<sup>7</sup> Jakomeit, J.U.: Storfalloblaufanalyse von Domino-Effekten. Studienarbeit, Fachgebiet Anlagen- und Sicherheitstechnik, Technische Universität Berlin, 2001.

Таблица 1

| Дата и место аварии  | Причина аварии  | Последствия аварии   |
|--|---|--|
| 04.01.66. НПЗ в г. Фейзене, Франция                                      | Разгерметизация шарового резервуара с пропаном  | Ущерб — 606 млн. немецких марок  |
| 21.06.70. Железнодорожный состав в г. Кресценте, штат Иллинойс, США      | Сход с рельсов цистерны с сжиженным газом с последующей разгерметизацией и воспламенением | Ущерб — 7,5 млн. долл. США   |
| 30.05.78. НПЗ в Техасе, США  | Переполнение шарового резервуара с изобутаном   | Ущерб — 100 млн. долл. США   |
| 19.11.84. Нефтехимическая установка в г. Сан Жуан Иксуатепеке, Мексика   | Утечка сжиженного природного газа   | Погибло 650 человек  |
| 07.03.89. Производство окиси этилена в г. Антверпене, Бельгия            | Разуплотнение и выход наружу газообразной окиси этилена с последующим взрывом             | Значительно разрушено технологическое оборудование   |
| 23.10.89. Производство полиэтилена в Техасе, США                         | Загазованность и взрыв  | Погибли 22 человека, значительно разрушено технологическое оборудование, две технологические установки выведены из строя |
| 14.09.97. Терминал нефтеперерабатывающего завода в Вишакхапатнаме, Индия | Возгорание одного из восьми резервуаров с ЛВЖ   | Погибли 60 человек, разрушено технологическое оборудование   |

Таблица 2

| Параметр  | Технологическое оборудование | Трубопроводы | Вспомогательное оборудование | Резервуары для хранения  |  |
|---|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------|--|
|   |                              |              |                              | под избыточным давлением | под атмосферным давлением или криогенные |
| Оборудование, участвующее в авариях, %: первичных, т.е. тех, которые в дальнейшем развиваются с «эффектом домино» | 30                           | 12           | < 1                          | 30                       | 28                                       |
| вторичных, т.е. тех, которые уже развиваются с «эффектом домино»  | 12                           | < 1          | 9                            | 33                       | 46                                       |

Таблица 3

| Исследуемое вещество  | Количество аварий |                                   |                                    |
|---|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|   | анализируемых     | с минимум одним «эффектом домино» | с минимум двумя «эффектами домино» |
| Горючие и легковоспламеняющиеся жидкости (сырая нефть, бензин, керосин) | 43                | 21 (0,488)                        | 8 (0,186)                          |
| Газообразные углеводороды (C <sub>1</sub> –C <sub>4</sub> )             | 50                | 29 (0,58)                         | 14 (0,28)                          |
| Токсичные вещества (хлор, аммиак, пестициды)                            | 45                | 7 (0,156)                         | 2 (0,044)                          |
| Другие вещества   | 69                | 23 (0,333)                        | 10 (0,145)                         |
| Всего   | 207               | 80 (0,386)                        | 34 (0,164)                         |

«эффектом домино» чаще всего на складах легковоспламеняющихся веществ и сжиженных углеводородных газов (58–79 %) и с несколько меньшей частотой на технологическом оборудовании установок (30–12 %). Как следует из табл. 3, 38 % всех аварий развиваются как минимум до одного «эффекта домино», что означает вовлечение в аварию минимум одной позиции оборудования, и 16 % всех аварий развиваются как минимум до двукратного «эффекта домино», что означает вовлечение в аварию минимум двух позиций оборудования. Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что развитию аварии с «эффектом домино» наиболее способствуют близость расположения оборудования и горючесть вещества.

На сегодняшний день отсутствуют достоверные методики количественной оценки риска «эффекта домино». В то же время при разработке проектной документации, декларации безопасности, плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций и аварий (ПЛАС) необходимо учесть возможность этого развития аварии, которое может привести к существенному увеличению показателей риска. При составлении деклараций безопасности или иных работах по оценке риска учет «эффекта домино», как правило, проводится лишь качественно, исходя из количественного анализа последствий отдельных сценариев аварий при разрушении единичной емкости или отдельного участка трубопровода. Возможность каскадного развития аварии на объекте определяется исходя из условия попадания в зоны разрушений соседнего оборудования. При разработке мероприятий по локализации и ликвидации аварийных ситуаций и аварий для составления ПЛАС учет «эффекта домино» тем более актуален, что заблаговременное прогнозирование неблагоприятного сценария позволяет выбрать действенную тактику предупреждения таких сценариев.

нариев либо ограничения последствий при их реализации, подобрать безопасные маршруты вывода людей и прибытия аварийно-спасательных формирований.

Помимо производственных факторов, способствующих или вызывающих каскадное развитие аварии (высокая концентрация оборудования на производственной площадке, повышенное количество обрабатываемых опасных веществ, специфика технологии, состояние промышленной безопасности и т.д.), для учета «эффекта домино» на взрывоопасном производстве необходимо выделить: избыточное давление и импульс положительной фазы сжатия во фронте ударной волны взрыва; время действия фазы сжатия ударной волны взрыва; дозу или интенсивность теплового воздействия, получаемую неаварийным объектом за период действия поражающего фактора аварии.

Обломки оборудования, разлетающиеся вследствие его мгновенного разрыва, также могут быть источниками инициирования «эффекта домино».

С позиций прогнозирования «эффекта домино» представляют интерес пороговые значения рассмотренных выше факторов, воздействие которых приводит к разгерметизации данного оборудования. В различной отечественной литературе, в том числе и нормативной, есть сведения о величине этого воздействия и вызываемых им последствиях. Как в отечественной, так и в зарубежной практике наиболее полно раскрыт вопрос пороговых значений избыточного давления взрыва для различного вида оборудования, сооружений и объектов и причиняемой степени повреждения [2]. Однако нигде не сообщается, какая степень повреждения или какая величина негативного воздействия может вызвать каскадное развитие аварии.

Для каскадного развития аварии необязательно полное разрушение оборудования или обрушение, достаточно разгерметизации одного из его элементов трубопроводной обвязки, обрыва штуцера, что соответствует слабой степени повреждения. При этом полного мгновенного вовлечения в аварию опасного вещества из оборудования, скорее всего не произойдет, однако возникнет риск дальнейшего развития аварии. Исход такого сценария будет зависеть от многих факторов (вид вещества и его параметры, наличие и работоспособность средств противоаварийной защиты, готовность персонала к локализации и бойцов аварийно-спасательных бригад к локализации и ликвидации аварии).

Избыточное давление  $\Delta p$ , кПа, воздействие которого на оборудование, коммуникации, объект может вызвать повреждение, способное привести к «эффекту домино», приведено ниже:

|  |       |
|--|-------|
| Наземные хранилища ГСМ и химических веществ, наземный цилиндрический резервуар, другая емкость ..... | 15–40 |
| Частично заглубленные резервуары для хранения нефтепродуктов .....                                   | 20    |
| Подземные резервуары .....   | 40    |
| Котельные, регуляторные станции и другие сооружения в кирпичных зданиях .....                        | 7–13  |
| Трубопроводы наземные .....  | 20    |
| Трубопроводы на металлических или железобетонных эстакадах .....                                     | 20–30 |
| Автоцистерна (на АЗС) .....  | 20–30 |
| Железнодорожная цистерна для сжиженного газа, нефтепродукта .....                                    | 30    |
| Коммуникации энергоснабжения в галерее на железобетонной эстакаде .....                              | 10–15 |

При анализе риска аварий, в первую очередь, целесообразно учитывать те сценарии, при которых в аварию вовлекается оборудование с наибольшим количеством опасного вещества, т.е. когда последствия могут быть наиболее тяжелыми. В табл. 4 приведены пороговые значения аварийных нагрузок возможности инициирования «эффекта домино», используемые в некоторых странах ЕЭС.

Таблица 4

| Страна               | Интенсивность теплового облучения, кВт/м <sup>2</sup> | Избыточное давление взрыва, кПа |
|----------------------|---|---------------------------------|
| Бельгия <sup>1</sup> | 8,0   | 16                              |
| Франция <sup>2</sup> | 5,0   | 14                              |
| Австрия <sup>3</sup> | 12,5  | 10                              |

<sup>1</sup> Delvosalle, C. 1998: A methodology for the identification and evaluation of domino effects. Belgian Ministry of Employment and Labour, Administration of Labour, Safety Chemical risks directorate, first ed., 1998.

<sup>2</sup> Christou, M. and S. Duffield: Guidance for the Implementation of Art. 12 of the Seveso II Directive on Land-Use Planning in the Context of Major Accident Hazards. European Commission, Joint Re-search Centre, MAHB, Lille, France, 12 February 2002.

<sup>3</sup> Stangl, M. and E. Simon: Land Use Planning & Seveso II Implementation in Austria. The practice in the Austrian Lander, European Commission, Joint Research Centre, MAHB, Lille, France, 12 February 2002.

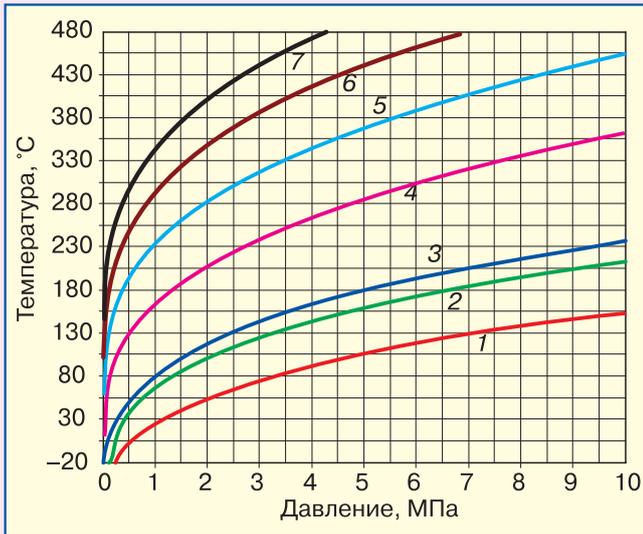
В Германии, по состоянию на 2003 г., пороговые значения нагрузок, инициирующих «эффект домино», официально не приняты. В качестве рекомендуемых пороговых значений используются<sup>1</sup>: избыточное давление — 16 кПа; тепловая нагрузка при отсутствии огнезащиты — 8 кВт/м<sup>2</sup>, при ее наличии — 32 кВт/м<sup>2</sup>.

Там же сообщается, что разрушение резервуаров нефти и нефтепродуктов наступает при избыточном давлении взрыва, равном 21,5 кПа. Однако в упомянутом источнике данные об опасной длительности теплового воздействия отсутствуют.

Рассмотрим влияние теплового излучения в качестве фактора, инициирующего «эффект домино». Тепловое воздействие излучением приводит к росту

<sup>1</sup> Lees, F.P.: Loss Prevention in the Process Industries — Hazard Identification, Assessment and Control, Second Edition, Butterworth Heinemann, 1996.

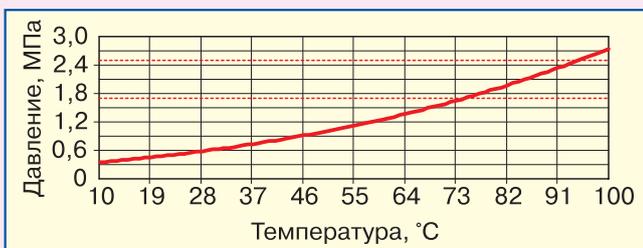
температуры опасного вещества, содержащегося в сосуде. Неконтролируемое увеличение температуры в аппаратах вызывает рост давления насыщенных паров и, как следствие, повышение давления в сосудах. Зависимость давления паров углеводородов пропана, н-бутана, и-бутана, фракции 75, 125, 175, 225 от температуры (диаграмма фазового равновесия) в аппарате представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость давления насыщенных паров пропана (1), и-бутана (2), н-бутана (3), углеводородных фракций 75 (4), 125 (5), 175 (6), 225 (7) от температуры

Неконтролируемое увеличение давления в сосуде может привести к его разгерметизации. Рассмотрим влияние температуры на давление насыщенных паров и общее давление в технологическом аппарате на примере колонны газофракционирования, предназначенной для разделения смеси углеводородов на пропан и бутан. На рис. 2 приведена зависимость давления насыщенных паров смеси (40 % пропана и 60 % бутана) от температуры.

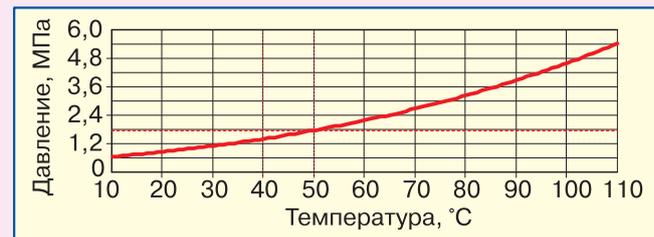
Колонна газофракционирования, изготовленная из стали 09Г2С-15 по ГОСТ 5520—79, имеет следующие параметры: объем  $V=90,7 \text{ м}^3$ , диаметр 2200 мм, высота 25 920 мм, расчетное давление 2,5 МПа, расчетная температура 150 °С, рабочая температура верха колонны 53–55 °С, рабочая температура сере-



**Рис. 2.** Зависимость давления насыщенных паров смеси пропана и бутана от температуры

дины (16-я тарелка) колонны 67–69 °С, рабочая температура куба колонны 100–102 °С. Из рис. 2 следует, что для анализируемой смеси рост температуры верха колонны до 95 °С, т.е. на 40 °С, при отказе предохранительного клапана приведет к повышению давления более расчетного и, как следствие, к разрушению колонны с выбросом большого количества взрывоопасного газа. Согласно статистике, выбросы сжиженных углеводородных газов чаще всего заканчиваются взрывом или огненным шаром.

Рассмотрим влияние температуры на давление насыщенных паров и общее давление в технологическом аппарате на примере емкости, предназначенной для хранения сжиженного пропана технического. На рис. 3 показана зависимость давления насыщенных паров пропана технического (не менее 75 % пропана и пропилена) от температуры.



**Рис. 3.** Зависимость давления насыщенных паров пропана технического от температуры

Емкость для хранения пропана технического С.039Е-1–10, изготовленная из стали 09Г2С-15 по ГОСТ 5520—79, имеет следующие параметры: объем 200 м<sup>3</sup>, диаметр 3400 мм, длина 21 000 мм, расчетное давление 1,76 МПа, расчетная температура –55 °С, рабочая температура 20–40 °С, рабочее давление 0,5–1,4 МПа. Из рис. 3 видно, что для анализируемого вещества рост температуры до 50 °С, при отказе предохранительного клапана, приведет к повышению давления более расчетного, т.е. более 1,76 МПа и, как следствие, к разрушению емкости. Изменение температуры от рабочей до температуры разрушения составило 10 °С.

Рассмотрим влияние температуры на давление насыщенных паров и общее давление в технологическом аппарате на примере емкости, предназначенной для хранения сжиженного бутана технического (60 % бутана, 40 % пропана). Как можно видеть из рис. 2, для анализируемого вещества рост температуры до 74 °С при отказе предохранительного клапана приведет к повышению давления более расчетного, т.е. более 1,76 МПа и, как следствие, к разрушению емкости. Изменение температуры от рабочей до температуры разрушения составило 34 °С.

Как правило, технологическое оборудование (колонны, рефлюксные и буферные емкости, сепараторы, теплообменники) и емкости для хранения сжиженных углеводородных газов имеют тепловую

изоляцию. Например, проектной документацией на строительство одного из крупнотоннажных заводов по переработке газового конденсата предусмотрено на теплоизоляция емкостей для хранения пропана и бутана технических, а также их смесей в виде матов из супертонкого стекловолокна без связующего согласно ТУ 21-РСФСР-224—75 толщиной 60 мм. Покрытием изоляции служит алюминиевый лист марки АД-1 по ГОСТ 21631—76 толщиной 1 мм.

Результаты расчетов показали, что наличие теплоизоляции при тепловом воздействии излучением эффективно препятствует нагреву содержимого емкости лишь в случае некоторого удаления от эпицентра пожара. В ближних к эпицентру пожара областях тепловые лучевые потоки характеризуются высокой интенсивностью, достаточной для приведения алюминиевого покрытия изоляции в негодность. Например, для огненного шара с массой горючего вещества 30 т (горючее — пропан, радиус огненного шара 77 м, длительность горения 21 с) на расстоянии от проекции центра шара до мишени 100 м покрытие теплоизоляции из алюминиевого листа толщиной 1 мм придет в негодность (нагрев до критической температуры 250 °С) приблизительно через 8 с. Также ближние к эпицентру области, вследствие теплового расширения продуктов сгорания, будут характеризоваться некоторой ветровой нагрузкой, способствующей разрушению матов изоляции. Воздействие интенсивного теплового облучения может вызвать спекание волокон и потерю матами теплоизоляционных характеристик. Поэтому в дальнейших расчетах из наихудших предположений принималось, что энергия теплового излучения расходуется на прогорание алюминиевого покрытия и нагрев содержимого резервуара.

Особое значение при определении дозы от теплового облучения имеет выбор метода расчета. Наиболее верная оценка тепловой дозы получается при использовании метода интегрирования по поверхности мишени, основанного на точном учете геометрии поверхности мишени [3].

Выражение для определения дозы  $Q$ , кДж, теплового облучения мишени для случая излучателя и мишени, имеющих сферическую форму, без учета черноты поверхности мишени и коэффициента излучения излучателя, получим в виде:

$$Q = \frac{P_{FB} F_R}{4\pi} \tau t R_{SH}^2 \int_{\gamma_g} d\gamma_g \int_{\gamma_v} \frac{\sin \gamma_v \cos \beta(\gamma_v)}{R_m^2(\gamma_v)} d\gamma_v,$$

где  $P_{FB}$  — общая тепловая мощность сгорания огненного шара, кВт;  $F_R$  — доля энергии теплового излучения в общем тепловыделении;  $\tau$  — коэффициент пропускания атмосферы;  $t$  — время сгорания огненного шара, с;  $R_{SH}$  — радиус шарового резервуара (мишени), м;  $\gamma_g, \gamma_v$  — угол облучения мишени

соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях, градус;  $\beta(\gamma_v)$  — угол падения луча на мишень, градус;  $R_m(\gamma_v)$  — расстояние от геометрического центра огненного шара до элементарной площадки поверхности мишени, м.

В дальнейшем все результаты расчетов дозы теплового облучения мишени получены методом интегрирования по поверхности мишени.

На рис. 4 представлена зависимость интенсивности теплового излучения огненного шара от расстояния. Из рисунка видно, что ближние к эпицентру области (до 1,5 радиуса огненного шара) характеризуются достаточно высокой интенсивностью теплового излучения: от 240 до 70 кВт/м<sup>2</sup>. На рис. 5 приведена зависимость роста температуры вещества в вертикальном цилиндрическом резервуаре от расстояния между ним и излучателем. Рост температуры вещества в вертикальном цилиндрическом сосуде с радиусом 5 м и высотой 15 м (заполнение 10 %, степень черноты принята 1, плотность среды 750 кг/м<sup>3</sup>) при воздействии теплового излучения с



Рис. 4. Зависимость интенсивности теплового излучения огненного шара от расстояния

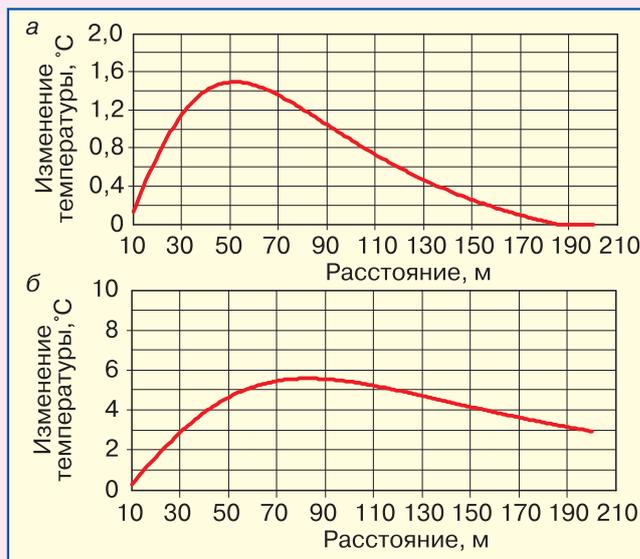


Рис. 5. Зависимость роста температуры вещества в вертикальном цилиндрическом резервуаре от расстояния между ним и излучателем:

а — масса горючего 30 т; резервуар с теплоизоляцией; б — то же, 100 т, без теплоизоляции

учетом тепла, отводимого на нагрев алюминиевого покрытия теплоизоляции до критической температуры прогрева, т.е. до 250 °С, можно проследить по рис. 5. В расчетах принят огненный шар с массой горючего вещества 30 т (горючее — пропан, радиус огненного шара 77 м, длительность горения 21 с).

Как следует из рис. 5, рост температуры вещества, находящегося в теплоизолированном оборудовании, не превышает 2 °С. Заметим, что интенсивность теплового излучения огненного шара рассчитывалась по модели излучения точечного источника [4], а доза — методом интегрирования по поверхности мишени [3]. Однако, исследуя процесс превращения огненного шара, отмечаем, что газы, которые наиболее вероятно могут сгорать по модели огненного шара, имеют более высокую плотность, чем плотность воздуха, а поэтому в начальный момент облако газа имеет форму полусферы с основанием, лежащим на поверхности земли, и лишь в своей конечной фазе горящее облако примет форму шара. Вследствие этого при расчете мощности излучения правомочно перейти от модели шара к модели полусферы. Доза при этом вырастет ровно вдвое. Максимальный рост температуры при таком переходе не превысит 3,5 °С, что втрое меньше роста температуры (10 °С) для пропана, приводящего к разрушению сосуда.

Результаты расчетов показывают, что огненный шар массой до 100 т (радиус 115 м, время горения 30 с) в отсутствие прямого огневого контакта, при наличии теплоизоляции и предполагаемом удвоении дозы, вызывает повышение температуры содержимого в исследуемом резервуаре, расположенном на расстоянии от проекции центра огненного шара на землю 100 м, до 5 °С, что не приведет к разрушению резервуара вследствие роста давления насыщенных паров.

Однако анализ крупных промышленных объектов с обращением сжиженных углеводородных газов (СУГ) показывает, что интенсивный рост испарения СУГ приводит к скачкообразно высокой нерасчетной нагрузке на компрессорное оборудование цикла конденсации паров хранения и сбросу избытка паров на факельную установку. При этом из-за повышения давления и количества паров может произойти отказ какого-либо узла и, как следствие, разгерметизация оборудования и загазованность территории промышленной площадки. А так как данная разгерметизация сама стала следствием уже происшедшей аварии, то воспламенение вновь образовавшегося облака практически неизбежно.

В случае, когда обращающимися веществами являются легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), которые хранятся в емкостях без теплоизоляции, рост температуры из-за лучевого воздействия огненного шара массой до 100 т (радиус 115 м, время горения 30 с) в отсутствие прямого огневого контакта в исследуемом резервуаре с заполнением до

10 % и предполагаемом удвоении дозы составит 6 °С, что также не приведет к разрушению резервуара вследствие роста давления насыщенных паров. Однако часто проектирование складов хранения ЛВЖ — нефтепродуктов осуществляется со сбросом паров дыхания продуктов в атмосферу, что вызывает загазованность территории, а при наличии аварии, последующее воспламенение от уже существующего источника. Учитывая высокий процент отказов огнепреградителей, можно вполне обоснованно прогнозировать проскок пламени в резервуар в газозаполненное пространство и пожар внутри резервуара.

Из вышеизложенного следует, что в отсутствие прямого огневого контакта энергии излучения огненного шара, приходящей на поверхность мишени-резервуара, недостаточно для повышения давления паров хранимого продукта до расчетного значения из условий прочности сосуда. Указанное обстоятельство исключает возможность прямого инициирования каскадного развития аварии вследствие теплового воздействия излучением огненного шара. Главным образом это происходит из-за незначительного времени существования огненного шара. Однако под воздействием теплового излучения увеличивается испаряемость ЛВЖ или СУГ, что при отсутствии системы сбора и утилизации паров влечет за собой интенсивную загазованность территории и дальнейшее развитие аварии. Применение факельных установок, систем закрытого сброса и утилизации паров, образующихся при хранении ЛВЖ и СУГ, позволяет повысить безопасность эксплуатации резервуарного и другого технологического оборудования. Пропускную способность таких систем необходимо рассчитывать с учетом возможного негативного теплового воздействия различных форм пожара, в том числе и при одновременном лучевом воздействии на весь склад либо технологическую установку в целом.

Таким образом, каскадное развитие аварии с выбросом опасных веществ необходимо учитывать при принятии мер безопасности, в том числе при анализе риска и экспертизе проектной документации.

### Список литературы

1. Азаров Н.И., Давидюк О.В., Лисанов М.В. Предупреждение промышленных аварий на основе директив Севезо // Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 12. — С. 42–47.
2. Михно Е.П. Ликвидация последствий аварий и стихийных бедствий. — М.: Атомиздат, 1979. — 288 с.
3. Давидюк О.В., Соловей В.В. Определение углового коэффициента теплового облучения мишени сферической формы. Матеріали науково-технічної конференції. Актуальні проблеми наглядово-профілактичної діяльності МНС України. — Харків: УЦЗУ, 2006. — С. 66–68.
4. Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 672 с.