

Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска



Е.А. Агапова,
мл. науч.
сотрудник



Д.В. Дегтярёв,
ст. науч.
сотрудник



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



А.С. Крюков,
руководитель центра
«Эксплуатация
технологических
процессов и
стандартизация»



С.Б. Кульберг,
гл. эксперт



С.И. Сумской,
канд. техн. наук,
ст. преподаватель

АНО АИПР

ЗАО НТЦ ПБ

ООО «СИБУР»

НИЯУ МИФИ

Настоящая работа продолжает цикл исследований по сравнению российских и зарубежных методик и компьютерных программ для целей прогнозирования и оценки риска аварий. Проведен сравнительный анализ результатов расчета зон поражения, выполненного в программах TOXI+, PHAST и FLACS для типовых сценариев аварий с выбросом горючих жидкостей, сжиженных углеводородов и токсичных газов. Представлены рекомендации по применению методик и компьютерных программ при разработке проектной документации, в том числе для декларирования промышленной безопасности, обоснования взрывобезопасных расстояний, взрывоустойчивости зданий и обоснования безопасности опасных производственных объектов.

This work continues a cycle of researches on comparison of the Russian and foreign methods and computer programs for the purposes of forecast and assessment of accidents risk. The comparative analysis of the results of exposure zones calculation was performed using TOXI+, PHAST and FLACS for typical scenarios of accidents with release of combustible liquids, liquefied hydrocarbons and toxic gases. Recommendations are given on the methods and computer programs application at the development of design documentation, including the industrial safety declaration, substantiation of blast-safe distances, blast-resistant buildings and substantiation of safety of hazardous production facilities.

Ключевые слова: риск, авария, взрыв, ударная волна, методики расчета, CFD-моделирование, PHAST, TOXI+, FLACS, верификация.

Key words: risk, accident, blast, blast wave, calculation methods, CFD-modeling, PHAST, TOXI+, FLACS, verification.

Повышение достоверности и точности моделей, методик и созданных на их основе программных комплексов (ПК) по оценке риска — одно из направлений совершенствования методов количественной оценки риска (КОР) — основной процедуры при декларировании, обосновании промышленной безопасности [1–11].

Очевидно, что одним из критериев обоснованности методик и программных продуктов должно быть совпадение результатов расчета по ним с данными экспериментов и расследования аварий, а также с результатами расчета, выполненного с помо-

щью других достоверных программных продуктов. Сравнение методик и программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска неоднократно проводили сотрудники ЗАО НТЦ ПБ [12–19], а также ряд российских и зарубежных специалистов [20–27]. В большинстве работ отмечено, что узкое место всех методик — определение массы горючего вещества в облаке топливно-воздушной смеси (ТВС) и скорости фронта пламени, значения которых нередко вследствие неопределенности их расчета задают экспертно. При таком подходе результаты работ [21, 23, 24], несмотря на некоторые расхождения, фак-

тически подтверждают адекватность Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (РД 03-409—01)¹ и зарубежного аналога — мультиэнергетического метода фирмы TNO (Нидерланды) [26]. Так, в работе [24] на примере расчета зон разрушения при аварии, которая произошла 22 ноября 2006 г. на предприятиях CAI и Arnel Manufacturing Facility (Дэнверс, США), находящихся на одной производственной площадке, сделан вывод, что методика РД 03-409—01 при известной скорости распространения пламени позволяет прогнозировать последствия взрывов ТВС в режиме дефлаграции с приемлемой точностью, в отличие от методики BST (Baker—Strehlow—Tang) [27], входящей в ПК PHAST международной фирмы DNV (http://www.dnv.ru/binaries/PhastMEBST_TechnicalSheet_MAR-10_tcm176-426698.pdf). Различие в результатах может быть связано с применением упрощенных моделей взрывного процесса, характерных для методик параметрического типа, которые заложены в наиболее распространенных ПК TOXI+Risk (<http://safety.ru/software/toxi#risk>) и PHAST [18, 19].

Параметрические, а также интегральные модели позволяют решать многие задачи с достаточной для практики точностью, однако ряд задач по моделированию аварийных ситуаций требует большей детализации, в частности получения полных данных по изменению того или иного параметра в любой точке пространства. К таким более сложным задачам относятся: распространение выбросов опасных веществ в реальных условиях рельефа местности и застройки территории при наличии препятствий и ограничений для рассеяния облака; рассеяние и взрывы выбросов в загроможденном и ограниченном окружающем пространстве, в том числе в помещениях. Для решения таких задач применяют специальные математические методы, основанные на численном решении систем дифференциальных уравнений в частных производных, — методы вычислительной гидродинамики, или CFD-методы (computational fluid dynamic methods). Наиболее известным и эффективным инструментом вычислительной гидродинамики взрывных аварийных процессов в настоящее время считается ПК FLACS разработки норвежской фирмы GEXCON (www.gexcon.com) [20, 28]. В основе его математического аппарата рассеяния и взрыва заложены соотношения, которые в настоящее время отражены и в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах» (утв. приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 160).

Рассмотрим подробнее возможности ПК, включающих модели параметрического и интегрального

типа (TOXI+, PHAST и их версии) и вычислительной гидродинамики (FLACS).

Сравнение возможностей компьютерных программ

Сравнение основных возможностей различных версий ПК TOXI, PHAST и FLACS приведено в табл. 1.

Видно, что ПК по возможностям расчета основных явлений при авариях и показателей риска (последнее относится только к TOXI+ и PHAST) практически совпадают. Исключение составляет отсутствие в программах PHAST и PHAST RISK методик расчета вероятности эвакуации, а в TOXI+ — метода расчета поражения от ударной волны при огненном шаре и физическом взрыве (малозначимы при реальных авариях).

Определенные ограничения имеет и ПК FLACS. Так, в программе не предусмотрен ввод исходных технологических данных (давление, температура, размер дефектного отверстия и т.д.) для анализируемого оборудования. В качестве исходных данных в таких случаях используют начальные данные (например, расход вещества, вероятностные параметры и др.), которые нужно предварительно вычислить, применив другие модели (программы). Также особенность данного ПК — трудоемкость подготовки исходных данных геометрии окружающего пространства (параметры помещения, здания, сооружений, рельеф местности). Следует отметить еще два важных момента, которые следует учитывать при применении ПК FLACS. Во-первых, для работы с FLACS требуется высокая квалификация пользователя, фактически только специалист, хорошо разбирающийся в газодинамике (в частности, в физике горения и взрыва), знакомый с особенностями моделей и численных методов, заложенных во FLACS, может подготовить входные данные, провести расчет и интерпретировать полученные результаты. Во-вторых, расчеты по FLACS могут занимать достаточно продолжительное время, в ряде случаев (особенно, когда требуется высокая точность) несколько часов, дней или даже недель.

В связи с этим на практике для решения прикладных задач по оценке последствий аварийных выбросов на наружных установках используют параметрические или интегральные модели и соответствующие ПК (TOXI+ и PHAST). Программы, основанные на численном моделировании, целесообразно применять для объектов со сложной геометрией (помещения цехов, загроможденные площадки, полузамкнутые пространства и др.), особенно в случаях, когда требуется высокая точность и не нужны многовариантные серийные расчеты.

Расчет рассеяния и сгорания облаков ТВС по различным методикам

Моделирование рассеяния длительного (струйного) выброса

¹ Актуализирована в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утв. приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 159). (Примеч. ред.)

Таблица 1

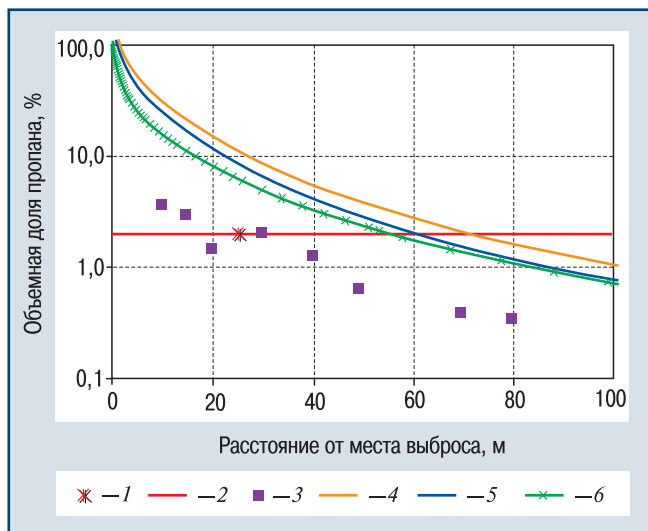
Операция	TOXI+ Risk	TOXI+	PHAST RISK	PHAST	FLACS
Расчет последствий отдельных сценариев аварии					
Оценка последствий аварийных выбросов веществ с учетом дрейфа облака:					
токсичных	+	+	+	+	+
горючих	+	+	+	+	+
Расчет для опасных веществ в жидкой и газовой фазе	+	+	+	+	+
Расчет для частичного и полного разрушения оборудования	+	+	+	+	+
					(путем задания начального расхода в подмодуле Flash)
Расчет для газов как легче, так и тяжелее воздуха	+	+	+	+	+
Расчет для пожара-вспышки	+	+	+	+	+
Расчет для факельного горения	+	+	+	+	+
Расчет факторов поражения ударной волной от физических взрывов	-	-	+	+	+
Оценка термического воздействия при пожарах пролива	+	+	+	+	+
Оценка последствий взрыва ТВС	+	+	+	+	+
Расчет интенсивности теплового излучения и времени существования огненного шара	+	+	+	+	-
Расчет факторов поражения ударной волной от огненного шара	-	-	+	+	-
Оценка максимального количества опасного вещества в облаке, ограниченном концентрационными пределами воспламенения	+	+	+	+	+
Нанесение зон поражения на планы местности	+	+	+	+	+
Ситуационный план:					
поддержка растровых и векторных форматов графики (bmp, jpg, wmf, AutoCAD)	+	+	+	+	-
нанесение большого числа векторных слоев рецептов	+	+	+	+	-
Расчет числа пострадавших	+	+	+	+	-
Программный подбор наиболее опасного направления ветра (с большим числом пострадавших)	+	+	-	-	-
Построение графиков изменения значений физических величин в ходе процесса	+	+	+	+	+
Задание виртуальных датчиков концентрации в пространстве	+	+	+	+	+
Анимация процесса распространения облака газа	+	+	+	+	+
Расчет показателей риска					
Построение поля потенциального риска (контуров риска)	+	-	+	-	+
Оценка индивидуального риска гибели людей в производственных зданиях при пожаре (расчет вероятности эвакуации)	+	-	-	-	-
Оценка показателей риска для наружных установок	+	-	+	-	-
Построение F/N-кривой	+	-	+	-	-
Учет реальных массивов метеоданных	+	-	+	-	+
Экспорт результатов в формате MS Word по пользовательским шаблонам (в максимально приближенном к российским требованиям виде)	+	+	-	-	-
Учет струевого разбавления выброса	- (возможно путем задания степени разбавления)	- (возможно путем задания степени разбавления)	+	+	+

Примечание. Знаки «+» и «-» — соответственно наличие и отсутствие возможности.

Рассматривали результаты расчета последствий выбросов опасных веществ и взрывов (в том числе в дефлаграционных режимах) облаков ТВС с использованием разных ПК. В целях верификации методик анализировали не только степень отклонения показателей и близость к фактическим данным, но и адекватность моделей, возможность прогноза влияния исходных данных (например, метеословий) на рассчитываемые параметры (зоны рассеяния, размеры зон разрушения).

Результаты расчета зон рассеяния при истечении сжиженного пропана из отверстия диаметром 20 мм — распределение концентрации вдоль прямой в направлении выброса (ветер в том же направлении), — выполненного в ПК TOXI+, представлены на рис. 1 (давление насыщенных паров пропана в емкости 0,86 МПа, температура 20 °С, интенсивность выброса 3 кг/с). Смоделированная ситуация соответствует опытам, приведенным в работе [21]. В связи с этим представляется интересным сравнить полученные в расчете результаты с данными опыта. К сожалению, в статье [21] приведена только скорость ветра, а класс устойчивости атмосферы не указан. Поэтому в расчетах рассматривали различные варианты стратификации атмосферы.

Как видно, все кривые достаточно консервативно описывают экспериментальные данные (идут выше экспериментальных точек). Это обусловлено тем, что приведенные на рис. 1 расчетные зависимости получены в предположении отсутствия разбавления, хотя на начальном участке выброса (первые 1–2 м) происходит существенное (в несколько раз) разбавление выброса за счет интенсивного подмешивания воздуха в струю. В расчете это подмешивание не учтено. Но следует отметить, характер спада концентрации и в рас-



▲ Рис. 1. Распределение объемной доли пропана на оси выброса:
 1 — место воспламенения; 2 — нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР); 3 — экспериментальные точки [29]; 4–6 — расчеты для классов устойчивости атмосферы соответственно А, D, F

четной зависимости, и в эксперименте совпадает. Это означает, что учет начального разбавления, например через задание на месте выброса уменьшенной концентрации, приведет к смещению вниз всех кривых и к хорошему совпадению расчетных и экспериментальных данных. Таким образом, TOXI+ дает консервативную оценку при формальном использовании установленных по умолчанию параметров расчета и удовлетворительно точное совпадение при использовании допущения о начальном разбавлении выброса.

Моделирование залпового выброса газообразного пропана

Другой вариант выброса — мгновенное поступление вещества в окружающую среду, так называемый залповый, или мгновенный, выброс. В качестве примера рассмотрим выброс 50 кг газообразного пропана, изначально находящегося в вертикальном цилиндре, высота которого равна радиусу.

В табл. 2 и на рис. 2 представлены результаты моделирования рассеивания облака пропана вследствие мгновенного выброса. Характеристики зоны существования взрывоопасных концентраций, рассчитанные в различных ПК, совпадают с удовлетворительной точностью.

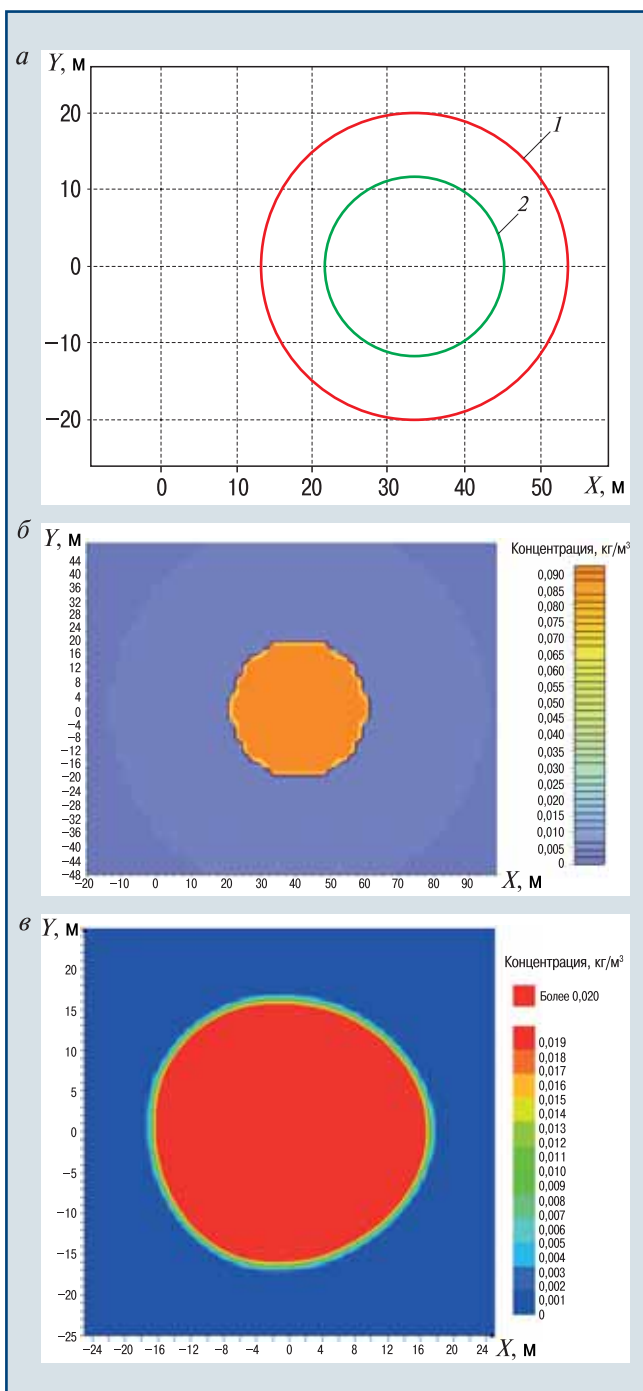
Таблица 2

Рассчитываемый параметр	PHAST	TOXI+Risk	FLACS
Радиус зоны НКПР, м	12	18	16
Высота зоны НКПР, м	0,7	0,6	0,8
Время исчезновения зоны НКПР, с	29	51	48
Максимальная взрывоопасная масса пропана, кг	31	40	44

Одна из наиболее существенных характеристик взрывоопасности ситуации — масса вещества (пропана), способная участвовать в энерговыделении и, соответственно, в создании зон поражения ударной волной. На рис. 3 по результатам моделирования рассеивания облака представлена зависимость от времени массы пропана, концентрация которого находится во взрывоопасных пределах (от НКПР до ВКПР). Видно, что в целом все три программы (PHAST, TOXI+Risk, FLACS) дают примерно одинаковую картину поведения взрывоопасной массы, как качественно (сначала — рост до максимального значения, затем — спад до нуля), так и по количественным показателям. Таким образом, имеется хорошее совпадение всех трех подходов.

Моделирование дефлаграционного сгорания облака водорода

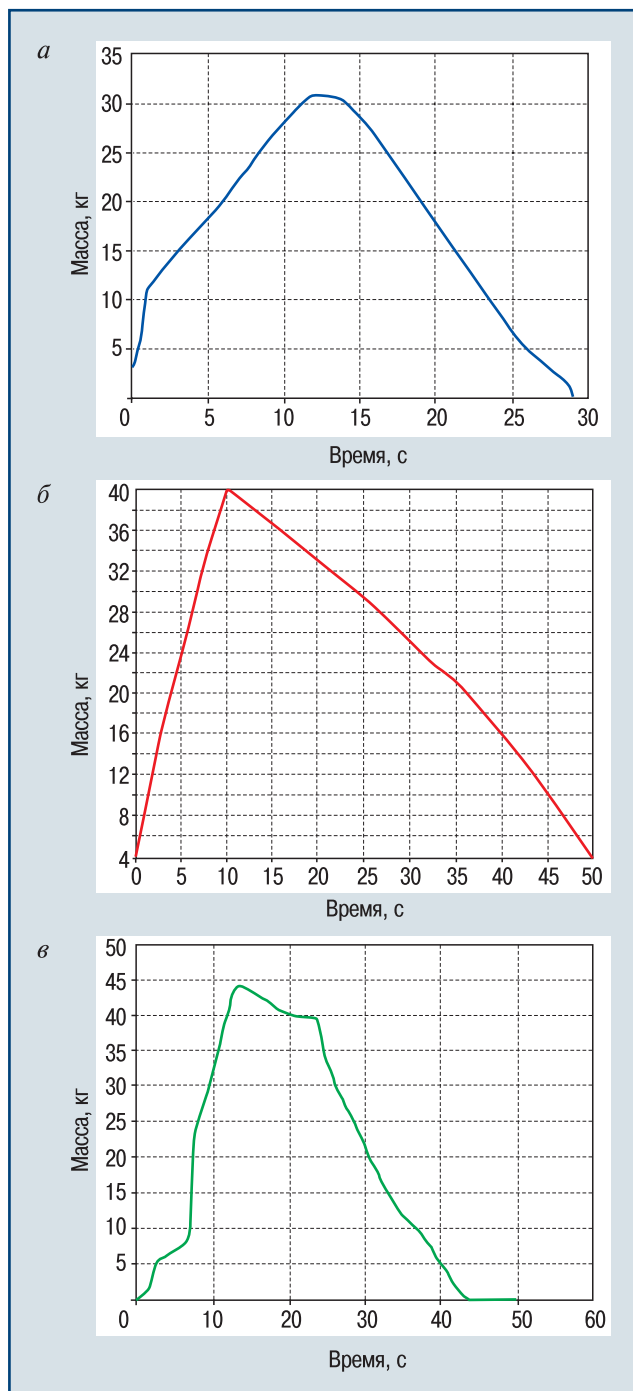
Помимо моделирования рассеяния облака взрывоопасных веществ значительный интерес представляет моделирование последствий взрыва ТВС. Только при правильном моделировании каждого из этих процессов возможно получить адекватный размер зоны поражения, поскольку он складывается, с одной стороны, из расстояния дрейфа облака,



▲ Рис. 2. Радиус зоны НКПР на 25-й с от начала выброса: а — PHAST (скорость ветра 2 м/с; класс устойчивости атмосферы D; 1 и 2 — концентрация соответственно 0,01 и 0,02 кг/м³); б — TOXI+Risk; в — FLACS

а с другой — из собственно радиусов зон поражения ударной волной при взрыве.

Провели моделирование дефлаграционного сгорания водородно-воздушного полусферического облака (радиус 20 м) на поверхности земли (в незагроможденном пространстве) при температуре среды 10° С, давление составляло 101,326 кПа, масса водорода — 52,3 кг. Следует отметить, что данная постановка задачи вполне реалистична и может рассматриваться как разумная аналогия реальной



▲ Рис. 3. Зависимость массы пропана, способного участвовать во взрыве, от времени: а — PHAST; б — TOXI+Risk; в — FLACS

аварийной ситуации — подобные облака могут образовываться при полном разрушении емкости. Данную ситуацию изучали в начале 1980-х годов [30]. Согласно экспериментам скорость сгорания водорода — величина непостоянная. Она постепенно увеличивалась, достигая максимума — 85 м/с; среднее значение составляло 62,5 м/с.

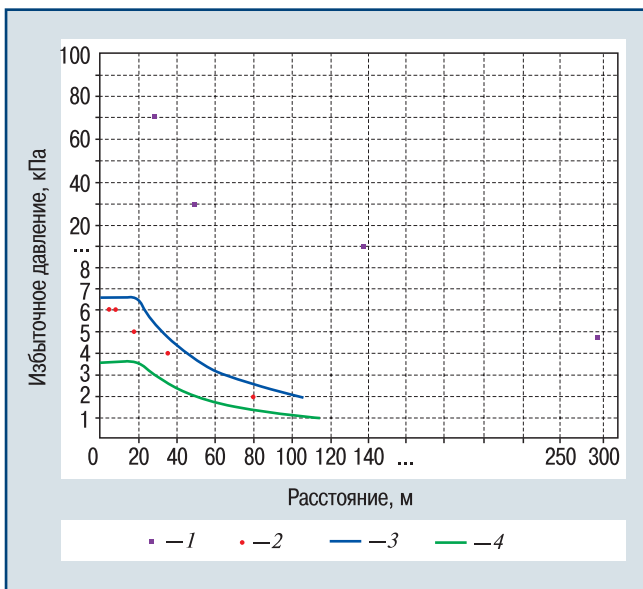
В табл. 3 приведены расстояния достижения заданного давления, полученные в эксперименте и рассчитанные в программах PHAST, TOXI+Risk, FLACS.

Таблица 3

Избыточное давление, кПа	Расстояние, на котором достигается соответствующее избыточное давление, м					
	Эксперимент	FLACS	TOXI+Risk		PHAST	
			u_{\max}	u_{cp}	TNT	BST
6	Внутри облака	5	26	—	95	125
5	18	7	35	—	108	148
4	35	12	47	—	128	184
2	80	25	105	52	218	350

В ПК PHAST существуют две модели расчета параметров ударных волн (TNT — модель тротилового эквивалента и BST), поэтому для ПК PHAST приведены два варианта расчета ударных волн. Также следует отметить, что в расчетах в ПК TOXI+Risk использовали явное задание скорости горения, соответствующее свободному незагроможденному пространству. Но в самой методике РД 03-409—01 такого классификационного типа пространства нет, что следует отнести к консервативности методики. Поскольку в опыте наблюдалось непостоянство скорости горения, то расчеты в ПК TOXI+Risk провели для средней скорости горения $u_{\text{cp}} = 62,5$ м/с и для максимальной $u_{\max} = 85$ м/с. При этом в случае видимой скорости горения 62,5 м/с не все значения давления, наблюдавшиеся в эксперименте, были достигнуты в расчете.

Наилучшее согласие с экспериментом достигнуто при расчете в ПК TOXI+Risk. Это отчетливо видно из рис. 4, на котором представлены результаты расчета изменения избыточного давления от расстояния для двух значений видимых скоростей



▲ Рис. 4. Изменение избыточного давления во фронте ударной волны при сгорании водородно-воздушной смеси:

1 — ПБ 09-540—03; 2 — эксперимент; 3, 4 — РД 03-409—01 при соответственно $u_{\max} = 85$ м/с и $u_{\text{cp}} = 62,5$ м/с

горения u_{cp} и u_{\max} (экспериментальные точки лежат как раз между этими линиями), а также расчета давления по тротиловому эквиваленту согласно приложению 3 к Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» (далее — ФНП ОПВБ). Как видно, расчеты по тротиловому эквиваленту (приложение 3 к ФНП ОПВБ) показывают превышение давления по сравнению с экспериментом и расчетом по методике РД 03-409—01 более чем в 10 раз. Таким образом, методика тротилового эквивалента — наиболее консервативная из всех рассматриваемых, она не учитывает специфические особенности физических процессов, протекающих при взрывах облаков.

Дополнительно проанализированы результаты моделирования взрывов и определения зоны загазованности по методике МЧС¹, которая включает основные соотношения для оценки зон разрушения при взрыве (РД 03-409—01), однако не учитывает дрейф облаков ТВС, что ограничивает область ее применения выбросами веществ в условиях безветрия.

Расчет показателей риска

Для проведения КОР для ОПО, на которых возможна реализация большого числа сценариев аварии, можно равно рекомендовать использование как отечественного комплекса TOXI+Risk, так и программного комплекса PHAST, которые дают вполне адекватную консервативную оценку последствий распространения и взрыва облаков ТВС. В то же время для наиболее сложных сценариев аварии, когда необходима точная оценка зон распространения поражающих факторов с учетом геометрии окружающего пространства, в том числе для взрывов в помещениях, следует использовать ПК, реализующие модели вычислительной гидродинамики, в частности FLACS.

Согласно анализу влияния исходных данных на размер зон поражения и на оценку риска при выбросе и взрыве облаков ТВС наиболее значимы: свойства опасных веществ и условия их содержания; диаметр дефектного отверстия; характеристика окружающего пространства; метеоусловия; учет систем противоаварийной защиты. При оценке риска определяющий фактор — выбор вероятностных характеристик аварийного процесса: частоты аварийной разгерметизации; условной вероятности образования дефектного отверстия (трещины); вероятностей воспламенения, срабатывания противоаварийной защиты и успешных действий по локализации аварийной ситуации.

¹ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404; в ред. приказа МЧС России от 14 дек. 2010 г. № 649// Бюл. норматив. актов федер. органов исполн. власти. — 2011. — № 8.

Заклучение

1. Приведенные результаты подтвердили адекватность расчетов рассеяния и взрыва облаков ТВС физическим явлениям и фактическим данным аварийных выбросов, а также приемлемую их точность при использовании ПК TOXI+Risk и PHAST. Расхождение в полученных результатах расчетов основных параметров выброса (масса, характерные размеры облака, достигаемая концентрация, дальность действия) в большинстве типовых случаев не превышает 20–50 %, что, учитывая неопределенность отдельных данных и допущений применяемых моделей, можно считать удовлетворительным для большинства практических задач КОР. Также близкие в целом значения дает моделирование с помощью комплекса FLACS.

2. В ряде случаев (например, при взрыве облака водорода) расчеты, выполненные с помощью ПК FLACS, — менее консервативные, чем сделанные в ПК TOXI+Risk и PHAST, что следует учитывать при выборе программных средств для решения практических задач по анализу риска.

3. Методика тротилового эквивалента не учитывает специфику физических процессов, протекающих при взрывах (сгораниях) облаков. При расчете последствий взрыва надо обязательно учитывать возможность дрейфа облаков, неучет этого фактора может приводить к неверным выводам, в том числе к занижению опасности, особенно для аварий с выбросом сжиженных углеводородных газов. Расстояния в зависимости от конкретной задачи могут отличаться в 2–10 раз по сравнению с экспериментами и расчетами, выполненными согласно методикам РД 03-409—01, РД 03-26—2007* (ТОXI+); TNO (ПК PHAST) и CFD-методам (ПК FLACS), отражающим реальные условия развития аварий с взрывами газовых облаков.

4. Учитывая сложность использования ПК FLACS (в частности, зависимость пользователей от появления новых версий и допущений, не всегда доводимых до пользователей, необходимость постоянного обучения и высокая стоимость продукта), предлагается продолжить изучение данного ПК в целях его обоснованного применения при решении вопросов промышленной безопасности. Следует учитывать также требования по импортозамещению зарубежной продукции, в том числе программного обеспечения. В настоящее время существуют более точные CFD-модели рассеяния и взрыва, учитывающие современные научные знания в области гидрогазодинамики, физики горения и взрыва, которые могут быть основой для разработки более совершенного программного продукта, чем FLACS.

5. Целесообразна разработка руководства по безопасности «Методические рекомендации по

применению программно-реализованных методов вычислительной гидродинамики для обоснования взрывобезопасности ОПО», позволяющего использовать методы вычислительной гидродинамики и применять компьютерные программы для моделирования аварийных выбросов опасных веществ в реальных условиях размещения оборудования, зданий и сооружений на ОПО.

Выражаем признательность ведущему специалисту отдела промышленной безопасности и анализа риска ООО «Институт риска и безопасности» канд. физ.-мат. наук В.А. Пантелееву за представление результатов расчетов в ПК PHAST.

Список литературы

1. Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений/ Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 6. — С. 82–89.
2. Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах/ К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 70–77.
3. Эльнатов А.И. Применение оценки риска при проектировании зданий и сооружений нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий// Проблемы анализа риска. — 2008. — Т. 5. — № 2. — С. 26–34.
4. Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов// Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 5. — С. 33–36.
5. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–63.
6. Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности/ М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.В. Савина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 3. — С. 58–66.
7. Савина А.В., Ханин Е.В., Сумской С.И. Оценка опасности производственных объектов, на которых используется соляная кислота, при декларировании промышленной безопасности// Безопасность труда в промышленности. — 2007. — № 7. — С. 56–63.
8. Оценка риска аварий на объектах хранения и переработки нефти и нефтепродуктов/ А.В. Пчельников, А.И. Гражданкин, И.А. Кручинина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 6. — С. 33–36.
9. Анализ риска газонаполнительной станции/ С.М. Лыков, А.И. Гражданкин, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 8. — С. 25–30.
10. Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Количественная оценка риска аварий в декларациях промышленной безопасности опасных производственных объек-

* Актуализирован в Руководстве по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» (утв. приказом Ростехнадзора от 20 апреля 2015 г. № 158).

тов топливно-энергетического комплекса// Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 1. — С. 46–48.

11. *Оценка опасности установок первичной переработки нефти при декларировании промышленной безопасности/ М.В. Лисанов, С.М. Лыков, А.С. Печеркин и др.*// Безопасность труда в промышленности. — 1999. — № 8. — С. 23–27.

12. *Агапов А.А., Агапова Е.А.* Сертификация и верификация программных средств// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 4. — С. 58–71.

13. *Пчельников А.В., Лисанов М.В., Сумской С.И.* Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере// Рос. хим. журнал. — 2005. — Т. XLIX. — № 4. — С. 18–28.

14. *Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий/ С.И. Сумской, К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин*// Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 10. — С. 42–50.

15. *Верификация методик для оценки последствий химических аварий/ С.А. Губин, С.М. Лыков, И.В. Маклашова и др.*// Химическая промышленность. — 1999. — № 10. — С. 58–66.

16. *Верификация методик оценки последствий аварийных выбросов газа от источников продолжительного действия/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, М.В. Лисанов и др.*// Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 28–35.

17. *Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий/ С.И. Сумской, К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин*// Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 10. — С. 42–50.

18. *Пантелеев В.А., Пчельников А.В., Сумской С.И.* Об опыте применения программного обеспечения Det Norske Veritas (DNV) PHAST-SAFETI для оценки риска промышленных объектов в России// Тезисы докладов на тематическом семинаре «Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах», 14–15 октября 2003 г./ под общ. ред. В.И. Сидорова. — М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. — С. 87–92.

19. *Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам TOXI+ и PHAST/ М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской, В.А. Пантелеев*// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 2. — С. 56–60.

20. *Olav R. Hansen, Mathieu Ichard, Scott G. Davis.* Validation of FLACS for Vapor Dispersion from LNG Spills: Model Evaluation Protocol// 12th Annual International Symposium of the Mary Kay O'Connor Process Safety Center, 27–28 Oct. 2009, Texas A&M University, College Station, Texas.

21. *Сравнительный анализ методик последствий взрывов газопаровоздушных смесей/ С.Г. Алексеев, Е.С. Гурьев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин*// Проблемы анализа риска. — 2013. — Т. 10. — № 4. — С. 12–19.

22. *Васьков Р.Е., Кочетов Н.М.* Надежность методик прогнозирования последствий взрыва топливно-воздушной смеси на опасном производственном объекте// Проблемы анализа риска. — 2014. — Т. 11. — № 6. — С. 60–71.

23. *Алексеев С.Г., Гурьев Е.С., Барбин Н.М.* Еще раз о сравнении методик прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей// Проблемы анализа риска. — 2015. — Т. 12. — № 2.

24. *Методы оценки взрывопожароопасности топливовоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2/ С.Г. Алексеев, А.С. Авдеев, Н.М. Барбин, Е.С. Гурьев*// Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24. — № 3. — С. 6–12.

25. *Антипов В.Н.* Анализ некоторых результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 71–77.

26. *CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects (Yellow book)/ by ed. C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings. — Part 2. Heat flux from fires. — Hague: Gevaarlijke Stoffen, 2005. — 870 p.*

27. *Vapor cloud explosion analysis: proc. 28th AIChE Annual Loss Prevention Symposium on Risk Analysis and Process Safety Management/ Baker, Tang, Scheier, Silva. — Atlanta, 1994.*

28. *Российско-норвежский проект «Баренц–2020»: гармонизация стандартов в области анализа риска/ Б. Пааске, М.В. Лисанов, В.С. Сафонов, А.А. Петрулевич*// Безопасность труда в промышленности. — 2011 — № 4. — С. 10–14.

29. *Builer C.J., Royle M.* Experimental data acquisition for validation of a new vapour cloud fire (VCF) modeling approach. Report HSL/2001/15/ Health and safety Laboratory. — Buxton, 2000.

30. *Schneider H., Pfortner H.* PNP-Sicherheitssofortprogramm, Prozebgasfreisetzung-Explosion in der gasfabrik und auswirkungen von Druckwellen auf das Containment, dez.1983: Fraunhofer-ICT internal report.

inform@safety.ru

Материал поступил в редакцию 3 сентября 2015 г.



От редакции

Вниманию авторов!

За публикацию научно-технических статей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Один экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору. Статьи рецензируются. Отрицательные рецензии доводятся до сведения авторов.

Журнал выпускается в свет и в электронной версии.