

# Верификация программного комплекса TOXI+Risk 5 в части моделирования пожаров пролива горючих жидкостей и «огненного шара»



**А.А. Агапов,**  
канд. техн. наук, директор  
расчетно-аналитического центра



**А.С. Софьин,**  
канд. техн. наук, зав.  
отделом



**С.Х. Зайнетдинов,**  
мл. науч. сотрудник



**В.В. Банников,**  
мл. науч. сотрудник,  
bannikov@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

В статье представлены обзор методов моделирования пожара пролива горючих жидкостей и «огненного шара», результаты сравнения расчетов с экспериментальными данными, а также некоторые выводы о применимости модулей «Огненный шар» и «Пожар пролива» программного комплекса TOXI+Risk 5 и адекватности получаемых результатов для количественной оценки пожарного риска и риска аварий на опасных производственных объектах.

**Ключевые слова:** оценка последствий аварий, количественная оценка риска, пожарный риск, риск аварии, опасные факторы, «огненный шар», пожар пролива, верификация, методика, программа, TOXI+Risk 5.

DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-7-14

## Введение

В настоящее время количественная оценка риска (КОР) промышленных аварий широко применяется при обосновании различных технических решений на всех стадиях жизненного цикла опасного производственного объекта. Соответствующие требования закреплены в федеральных законах и федеральных нормах и правилах [1, 2]. В основе КОР лежит множество взаимосвязанных методов, направленных на оценку возможности возникновения различных аварийных событий. Не вызывает сомнения, что для решения таких ответственных задач в составе КОР должны использоваться только подходы, успешно прошедшие процедуру верификации, которая заключается в сравнении параметров реальных физических процессов и явлений (эксперимент, авария) с результатами их физико-математического моделирования. Таким образом, одной из проблем является определение соответствия результатов, рассчитанных по математической модели, фактическим данным. Другая проблема состоит в определении соответствия результатов, рассчитанных с помощью программного средства, используемой в нем

математической модели. В данной статье затронуты обе эти проблемы.

За рубежом ряд международных организаций, научных институтов занимаются разработкой собственной методологии КОР. Отчеты о верификации элементов этой методологии — входящих в нее расчетных методик — обычно публикуются в открытых корпоративных источниках или научных журналах. Примерами таких работ являются, например, отчет о верификации модели рассеяния облака сжиженного природного газа (СПГ) [3] программного комплекса DNV PHAST, отчет Technical Reference Guide. Volume 3: Validation [4] программного комплекса FDS для моделирования пожаров.

В отечественной практике сложился несколько иной подход, который состоит в том, что процедуру КОР для объектов нефтегазовой промышленности и химических производств рекомендуется (либо следует) выполнять по утвержденным органами государственной власти методикам [5]. Такой подход подразумевает, что утверждаются заведомо корректные методики, прошедшие проверку, результаты которой, однако, не приводятся в нормативных и методических документах. Более того, часто, ме-

тодики не снабжаются ссылками на соответствующие научные первоисточники. Одним из основных минусов такого подхода является то, что даже для простейших методик достаточно сложно найти их научные «корни». Это отрицательно сказывается на качестве нормативных документов (трудновыявляемые опечатки, «забытые» границы применимости моделей и др.), затрудняет совершенствование математических моделей, а также препятствует использованию отечественных методик за рубежом, где надзорные органы или экспертные организации требуют предоставить научное обоснование корректности используемого методического и программного обеспечения.

Большинство отечественных материалов по верификации относится к области атомной промышленности, например [6, 7]. В этой области в 2018 г. введена [8] процедура обязательной экспертизы (ранее — обязательная аттестация) программных средств, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии. Имеется целый ряд публикаций по верификации математических моделей, вошедших в соответствующие руководства по безопасности Ростехнадзора, например [9].

Ряд методик, чей первоисточник сложно проследить, представлен, например, в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [10] и ГОСТ Р 12.3.047—2012 [11]. Проведенный анализ отечественных каталогов научных изданий выявил отсутствие в открытом доступе результатов верификации математических моделей для оценки последствий воздействия «огненного шара» и пожара пролива, представленных в этих документах. В то же время применение этих методик является обязательным при расчетах пожарного риска, они также рекомендованы к использованию Ростехнадзором для КОР.

В целях подтверждения адекватности подходов, применяемых в программном комплексе TOXI+Risk 5\*, и возможности применения этого программного продукта в том числе в зарубежных проектах проведена верификация его основных расчетных модулей на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. В статье представлены результаты такой верификации для моделей пожара пролива и «огненного шара» [10, 11].

### Методики

Методика моделирования эффекта «огненный шар» позволяет оценить зоны поражения тепловым излучением. Под «огненным шаром» подразумевают крупномасштабное диффузионное пламя, реализуемое при сгорании парогазового облака с concentra-

цией горючего выше верхнего концентрационного предела распространения пламени, возможного при разрушении резервуаров и сосудов с горючими жидкими перегретыми продуктами (сжиженный нефтяной газ, пропан, пропилен, винилхлорид и др.), содержащимися в замкнутых объемах.

В рассматриваемой модели «огненный шар» представляется в виде сферы, приподнятой над поверхностью земли. Сфера равномерно по всей своей поверхности излучает тепло с одинаковой по времени интенсивностью. Размеры и время существования сферы зависят от массы опасного вещества (ОВ), участвующего в горении.

В модели пожара пролива горючей жидкости принимается, что форма пламени соответствует наклонному цилиндру с площадью основания, равной площади пролива. Длина направляющей цилиндра (длина пламени) и угол ее наклона оцениваются с учетом скорости ветра, а также параметров горючего и размеров пролива. Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени определяется в зависимости от вида топлива (в том числе для жидкой фазы сжиженного углеводородного газа, СПГ, бензина, дизельного топлива, нефтепродуктов) с помощью специальной таблицы или по формулам.

Следует отметить, что аналогичные модели представлены, например, в стандарте нидерландской организации TNO Yellow Book [12]. Отличаются они главным образом только формулами для нахождения коэффициента пропускания атмосферы и оценки длины пламени от пожара пролива. Возвращаясь к вопросу о трудновыявляемых опечатках в нормативных документах, отметим, что в работе [13] указывается на ошибку в формуле (ПЗ.59) [10] определения геометрических параметров пламени пожара пролива по сравнению с оригинальной формулой. В [12] геометрические размеры пламени оценивают формулой Томаса [14], отличающейся от (ПЗ.59) знаком показателя степени эффективной скорости, что приводит к тому, что расчетная длина пламени при скорости ветра более 10 м/с по [10] более чем в 2 раза превышает величину, полученную по методике [12] (при диаметре пролива СПГ 20 м получаются значения длины пламени 20,9 и 40,5 м соответственно). Тем не менее все расчеты в TOXI+Risk 5, результаты которых приведены ниже, проводились по утвержденной МЧС России более консервативной методике [10].

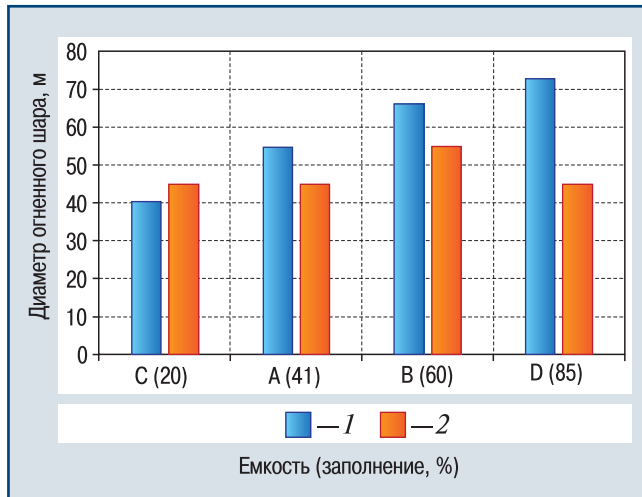
### Эксперименты и расчеты

Отделом безопасности процессов Лаборатории безопасности и здоровья (HSL, Великобритания) в конце 1990-х годов проведены полевые эксперименты с термическим воздействием струевого пламени на частично наполненные горизонтальные резервуары с пропаном емкостью 4,5 м<sup>3</sup> и диаметром 1,2 м [15]. Струя создавалась факельной установкой на жидком пропане с расходом 1,5 кг/с. Разрушение резервуара, сопровождающееся взрывом расширя-

\* Программный комплекс TOXI+Risk 5. URL: <https://toxi.ru/produktu/programmnyi-kompleks-toxirisk-5> (дата обращения: 03.07.2018).

ющихся паров вскипающей жидкости (Boiling liquid expanding vapour explosion, BLEVE) и «огненным шаром», происходило менее чем через 5 мин от начала теплового воздействия.

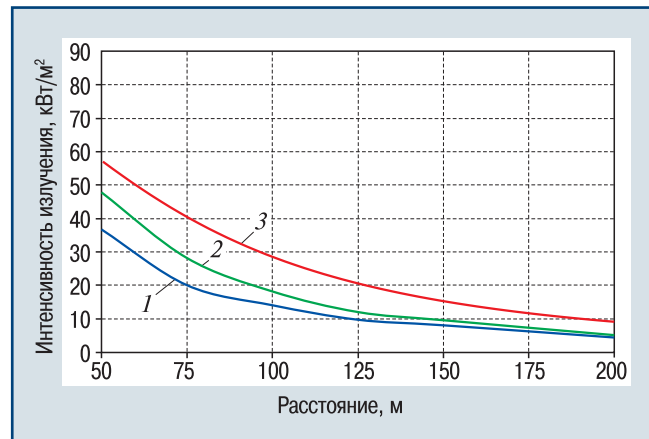
Результаты экспериментов и результаты моделирования с использованием расчетного модуля «Огненный шар» программного комплекса TOXI+Risk 5 по моделям [10, 11] представлены на рис. 1 (здесь 1 — расчет; 2 — эксперимент). В программе задаются следующие исходные данные: среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени (допускается принимать равной 350 кВт/м<sup>2</sup>), масса ОБ, высота центра «огненного шара» (допускается принимать равной его эффективному диаметру). В качестве результата расчета могут быть получены: диаметр и время существования «огненного шара», прямые и обратные зависимости интенсивности, дозы теплового излучения и вероятности поражения людей от расстояния от проекции центра «огненного шара» на поверхность земли.



▲ Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета диаметра «огненного шара» от резервуара с пропаном по методике «Огненный шар»  
▲ Fig. 1. Comparison of the experimental data and the results of calculation of the diameter of «fire ball» from the tank with propane according to the method of «Fire ball»

Для той же серии экспериментов получена [16] зависимость максимальной тепловой интенсивности от «огненного шара» в результате разрушения емкости с пропаном для 85 % заполнения. На рис. 2 представлены экспериментальные (по ветру 1 и против ветра 2) и расчетные 3 зависимости.

На рис. 1, 2 видно, что при небольшом заполнении емкости (20 %) рассчитанный диаметр «огненного шара» не более чем на 15 % отличается от результатов эксперимента, далее с ростом процента наполнения резервуара жидкостью рассчитанные диаметры получаются выше экспериментальных, расчетная кривая зависимости интенсивности теплового излучения также консервативно выше как для подветренной, так и наветренной сторон.



▲ Рис. 2. Зависимости теплового излучения «огненного шара» при разрушении емкости с пропаном от расстояния: экспериментальные (по ветру и против ветра) и рассчитанная по методике «Огненный шар»  
▲ Fig. 2. Dependences of the thermal radiation of the «Fire ball» at the destruction of the propane vessel on the distance: experimental (by the wind and against wind) and calculated according to the «Fire ball» methods

В другой серии крупномасштабных экспериментов [17] исследовалось сгорание в виде «огненных шаров» моторного топлива (бензин, керосин и дизтопливо) с массами топлива в диапазоне от 0,1 до 100 т.

Паровое облако в эксперименте создавалось в результате взрыва заряда взрывчатого вещества, расположенного в емкости с топливом. Горение в режиме дефлаграции происходило при 10–20-кратном избытке горючего.

Экспериментальные интерполяционные кривые и рассчитанные по методике «Огненный шар» зависимости диаметра «огненного шара» и длительности его существования от массы продукта для дизтоплива (эти же данные принимаются для керосина с учетом аналогии по плотности теплового излучения пламени) и бензина представлены на рис. 3 (здесь 1 — аппроксимация эксперимента (дизтопливо); 2 — аппроксимация эксперимента (бензин); 3 — расчет).

Заметим, что в расчетах рассматривается вещество с параметрами, «допускаемыми к использованию при отсутствии исходных данных». В данном случае среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени принималась равной 350 кВт/м<sup>2</sup>, а высота «огненного шара» — равной его диаметру.

Представленные результаты сравнения экспериментально полученных данных и данных моделирования демонстрируют некоторую консервативность последних для широкого диапазона масс топлива, участвующего в горении «огненного шара». При этом с ростом массы топлива завышение размеров зон поражения увеличивается (см. рис. 1, 4 (здесь 1–3 — то же, что на рис. 3) из-за переоценки диаметра «огненного шара» и времени его существования.

Методика «Пожар пролива»

Крупномасштабные эксперименты с пожаром пролива проведены в Японии (экспериментальный полигон Хигаши-Фудзи) в 1989 г. при участии исследователей Ямагучи и Вакаса [18]. Цилиндрические резервуары диаметрами 30; 50 и 80 м были заполнены слоем воды толщиной 200 мм, на поверхности которой находился слой керосина толщиной 20 мм, который поджигали. В эксперименте измерены значения интенсивности теплового излучения от пожара при штиле на расстояниях, кратных 1, 2, 3 и 4 диаметрам резервуара от центра каждого резервуара (с диаметрами 30 и 50 м). Ввиду того что в справочных материалах методики [10] отсутствуют данные по среднеповерхностной интенсивности излучения керосина, расчет проводился по бензину, что дало завышенную оценку размеров зон поражения. Сравнение интенсивности теплового излучения от пожара разлива керосина в экспериментах Ямагучи и Вакаса с результатами расчета представлены в табл. 1.

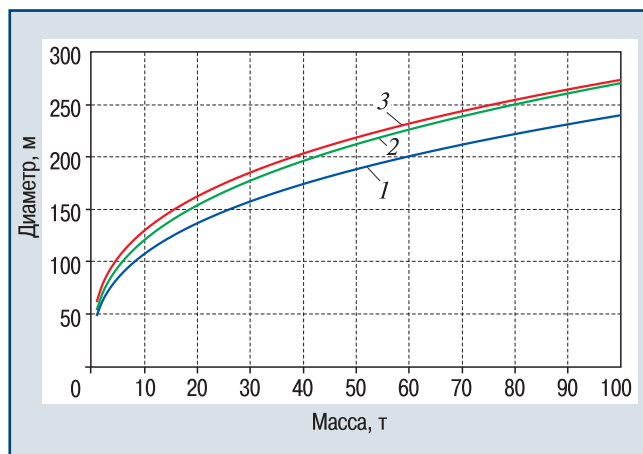
В серии экспериментов «Феникс» [19] изучалось горение разлива СПГ на водной поверхности в специально построенном резервуаре диаметром 120 м. Опыты проводились в 2007–2008 гг. главным образом для определения среднеповерхностной интенсивности теплового излучения пламени при горении пролива СПГ.

Проведены два эксперимента с диаметрами разливов 21 и 83 м. Датчики, измеряющие интенсивность теплового излучения, расположены на расстояниях: 110; 160; 210 м от центра резервуара.

В табл. 2 представлены характеристики пожара пролива, полученные в экспериментах серии «Феникс» и рассчитанные с помощью методики «Пожар пролива» программного комплекса TOXI+Risk 5. Отметим, что в расчетный модуль подставлялись данные из эксперимента: среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени и массовая скорость выгорания СПГ.

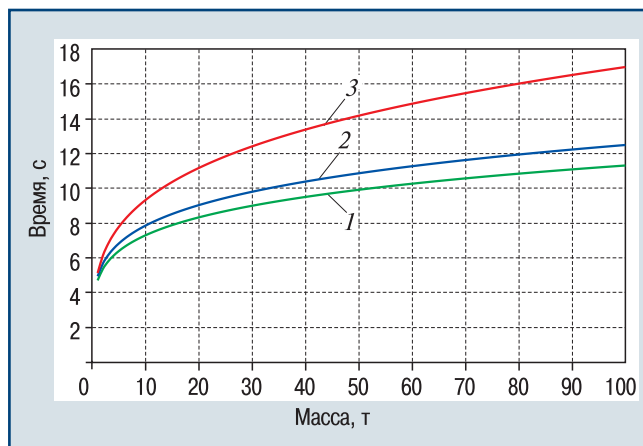
Эксперименты на оз. Чайна Лейк (Калифорния, США) проведены в 1977 г. [20]. Разлив углеводородов проводился на воде в специально построенном резервуаре 50×50×1 м.

Сравнение результатов эксперимента с расчетами приведено в табл. 3. Практически для всех тестов получено удовлетворительное соответствие между расчетом и экспериментом. Отметим, что для эксперимента с бензином (последняя строка табл. 3) расхождение между расчетным и экспериментальными значениями интенсивности излучения на больших расстояниях превышает относительную ошибку 100 %, выбранную в качестве критерия соответствия. Тем не менее результаты расчета для этого



▲ Рис. 3. Экспериментальные и рассчитанные по модулю «Огненный шар» зависимости диаметра «огненного шара» от массы продукта для дизельного топлива и бензина

▲ Fig. 3. Experimental and calculated on module «Fire ball» dependences of the diameter of the «Fire ball» on the mass of the product for diesel fuel and gasoline



▲ Рис. 4. Экспериментальные и рассчитанные по модулю «Огненный шар» зависимости времени существования «огненного шара» от массы продукта для дизельного топлива и бензина

▲ Fig. 4. Experimental and calculated on module «Fire ball» dependences of the lifetime of the «Fire ball» on mass of the product for diesel fuel and gasoline

Таблица 1

Диаметр резервуара, м	Расстояние от центра резервуара, м	Интенсивность теплового излучения		
		Эксперимент, кВт/м <sup>2</sup>	Расчет, кВт/м <sup>2</sup>	Относительное отклонение <sup>1</sup> , %
30	30	6,28	9,58	42
	60	2,67	3,20	18
	90	1,28	1,46	13
	120	0,72	0,81	12
50	50	2,21	6,61	99
	100	1,12	2,02	58
	150	0,63	0,89	34
	200	0,36	0,48	28

<sup>1</sup> Рассчитывается по формуле  $2[(C_p - C_s)/(C_p + C_s)] \cdot 100\%$ , где  $C_p$  и  $C_s$  — соответственно расчетные и экспериментальные значения.



Таблица 2

Расстояние, м	Интенсивность теплового излучения на заданном расстоянии от центра пролива, кВт/м <sup>2</sup>					
	Тест 1			Тест 2		
	Эксперимент	Расчет	Относительная ошибка <sup>1</sup> , %	Эксперимент	Расчет	Относительное отклонение <sup>1</sup> , %
110	6,20	8,22	28	39,40	52,81	29
160	2,40	3,16	27	20,80	28,91	33
210	1,30	1,61	21	13,30	17,48	27

<sup>1</sup> То же, что в табл. 1.

Таблица 3

Тест	Вещество	Диаметр пролива, м	Скорость ветра, м/с	Температура, К	Статус	Интенсивность теплового излучения, кВт · м <sup>2</sup> , на расстоянии, м		
						80	60	40
LPG #1	СПГ	16,9	Штиль	312	Эксперимент	5,40	11,00	41,80
					Расчет	4,58	8,00	16,48
					%	-16	-32	-87
LPG #3	СПГ	12,9	1	309	Эксперимент	1,60	2,80	14,60
					Расчет	3,13	5,54	11,80
					%	65	66	-21
LPG #4	СПГ	10,4	0,5	306	Эксперимент	4,10	6,50	29,70
					Расчет	3,30	5,69	11,48
					%	-22	-13	-88
LPG #5	СПГ	14,9	2,5	306	Эксперимент	4,10	8,70	41,00
					Расчет	4,54	8,81	21,47
					%	10	1	-63
Gasoline #1	Газолин	28,2	1	289	Эксперимент	0,82	1,30	7,30
					Расчет	2,37	3,92	7,26
					%	97	101	-1

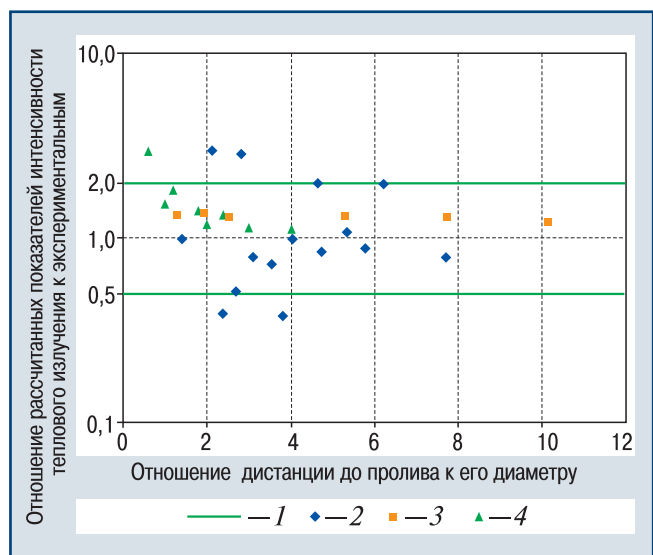
случая могут рассматриваться как консервативная оценка последствий пожара пролива, что вполне приемлемо для оценки опасности данного фактора аварии.

На рис. 5 представлены отношения рассчитанных по методике «Пожар пролива» интенсивностей теплового излучения к экспериментальным в зависимости от отношения дистанции до пролива к его диаметру; в дополнение на графике отображены прямые, обозначающие границы критерия FAC2 — отношение расчетных значений к экспериментальным здесь (1 — FAC2; 2 — Чайна Лейк; 3 — серия «Феникс»; 4 — Хигаши-Фудзи).

В табл. 4 представлены сравнительные статистические функции, такие как среднее относительное отклонение MRB (Mean Relative Bias), средняя относительная квадратичная ошибка MRSE (Mean Relative Square Error), FAC2, среднее геометрическое отклонение MG (Geometric Mean Bias) и геометрическая дисперсия VG (Geometric variance), полученные в ходе моделирования экспериментов с пожарами пролива<sup>1</sup>, и сравнительные показатели расчетных и экспериментальных данных пожаров проливов.

<sup>1</sup> Подробнее о перечисленных статистических функциях и рекомендуемых доверительных диапазонах можно прочитать, например, в [9].

Согласно рис. 5 в большинстве случаев отношения рассчитанных показателей интенсивности



▲ Рис. 5. Отношения рассчитанных по методике «Пожар пролива» показателей интенсивности теплового излучения к экспериментальным в зависимости от отношения дистанции до пролива к его диаметру

▲ Fig. 5. Ratios calculated on module «Pull fire» factors of the intensity of thermal radiation to the experimental values depending on the ratio of the pool fire distance to its diameter

Таблица 4

Серия	Эксперимент	Вещество	MRB	MRSE	FAC2	MG	VG
Хигаши-Фудзи	Test 1	Керосин	-0,21*	0,06*	1,25*	1,24*	1,06*
	Test 2	Керосин	-0,55**	0,38*	1,88*	1,78**	1,55*
Феникс	Test 1	СПГ	-0,26*	0,07*	1,29*	1,29*	1,06*
	Test 2	СПГ	-0,30*	0,09*	1,35*	1,35*	1,09*
Чайна Лейк	LPG #1	Пропан	0,45**	0,29*	0,66*	0,62*	1,39*
	LPG #3	Пропан	-0,36*	0,30*	1,58*	1,46*	1,38*
	LPG #4	Пропан	0,39*	0,28*	0,69*	0,65*	1,38*
	LPG #5	Пропан	0,17*	0,13*	0,88*	0,84*	1,15*
	Gasoline #1	Бензин	-0,66**	0,65*	2,30**	2,06**	2,19*

\* Значение входит в принятый доверительный диапазон.

\*\* Значение не входит в принятый доверительный диапазон.

к экспериментальным находятся в интервале 0,5–2 критерия FAC2. Некоторые отклонения, например завышение значений для керосина, связаны с тем, что ввиду отсутствия в методике указаний для расчета пожаров с веществом «керосин» в качестве консервативного аналога взят «бензин». Для СПГ в серии «Чайна Лейк» разброс значений, возможно, связан с погрешностями измерения параметров экспериментов, проведенных более 40 лет назад, поскольку более современные исследования дают существенно лучшую корреляцию с расчетом (не более 40 %, см. табл. 2). Рассчитанные параметры теплового излучения для пожара разлива бензина немного превышают экспериментальные значения, что вполне корректно для консервативной оценки при определении показателей риска.

Повторим, что методика пожара пролива использует допущение о форме разлива в виде круга. Такое допущение может существенно исказить форму реальной поверхности разлива, поэтому актуальной задачей является разработка методики для моделирования растекания жидкого ОВ по заданному рельефу местности, а также модели пожара пролива с учетом произвольной формы поверхности излучения. Нельзя также забывать о неточностях в математической модели методики, о которых говорилось выше.

### Выводы

Проведена верификация методик для оценки последствий образования «огненного шара» и пожара пролива, которая показала удовлетворительное совпадение результатов расчетов с данными экспериментов. Указана необходимость совершенствования методики моделирования пожара пролива в части учета растекания пролива по рельефу местности, а также возможности задания произвольной формы поверхности излучения.

Для повышения доверия к методам моделирования физических процессов, используемым в отечественных нормативных методических документах, при их опубликовании было бы крайне полезно

размещение в открытом доступе соответствующих отчетов о верификации этих методов, включающих ссылки на первоисточники математических моделей и результаты сравнения с экспериментальными данными.

### Список литературы

1. *Общие* правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — 3-е изд., испр. и доп. — Сер. 09. — Вып. 37. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2018. — 132 с.
2. *Технический* регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. — Сер. 19. — Вып. 1. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — 192 с.
3. *Witlox H.W.M., Harper M., Pitblado R.* Validation of PHAST Dispersion Model as Required for USA LNG Siting Applications// *Chemical Engineering Transactions*. — 2013. — Vol. 31.
4. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation/ K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott et al. [J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt].* URL: [https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS\\_Validation\\_Guide.pdf](https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS_Validation_Guide.pdf) (дата обращения: 03.07.2018).
5. *Агапов А.А., Агапова Е.А.* Сертификация и верификация программных средств// *Безопасность труда в промышленности*. — 2015. — № 4. — С. 58–60.
6. *Разработка* и верификация программного комплекса для вероятностного анализа безопасности ядерных установок проектного направления «Прорыв»/ Л.В. Абрамов, А.М. Бахметьев, И.А. Былов, А.А. Васюченков// *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. — 2016. — № 1. — С. 5–12.
7. *Разработка* и верификация модели конденсации для CFD расчетов задач водородной безопасности АЭС// *Известия российской академии наук. Энергетика*. — 2014. — № 4. — С. 123–141.
8. *О внесении* изменений в статью 26 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации: федер. закон от 23 мая 2018 г. № 118-ФЗ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/557485199> (дата обращения: 03.07.2018).
9. *База данных* натуральных экспериментов для верификации математических моделей рассеяния облаков «тяжелого» газа/ А.А. Агапов, В.В. Банников, Е.А. Дегтярева, С.И. Сумской// *Безопасность труда в промышленности*. — 2018. — № 6. — С. 35–44.
10. *Методика* определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. — Сер. 19. — Вып. 2. — Ч. 4. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — С. 112–192.
11. *ГОСТ Р 12.3.047–2012.* Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы конт-

роля. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 03.07.2018).

12. *Bosch Van Den C.J.H., Weterings R.A.P.M.* Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases): Yellow Book. URL: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (дата обращения: 03.07.2018).

13. *Влияние скорости ветра на поражающие факторы пожара разлития/ О.М. Зиновьева, Б.С. Мاستрюков, А.М. Меркулова и др. [Овчинникова Т.И., Серянина А.В.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2017. — № 1. — С. 13–19.*

14. *Thomas P.H.* The Size of Flames from Natural Fires. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.369.5324&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 03.07.2018).

15. *Venart J.E.S.* Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE); Possible Failure Mechanisms and Their Consequences. URL: [https://www.researchgate.net/publication/286746489\\_Boiling\\_liquid\\_expanding\\_vapour\\_explosions\\_BLEVE\\_Possible\\_failure\\_mechanisms\\_and\\_their\\_consequences](https://www.researchgate.net/publication/286746489_Boiling_liquid_expanding_vapour_explosions_BLEVE_Possible_failure_mechanisms_and_their_consequences) (дата обращения: 03.07.2018).

16. *Roberts T., Gosse A., Hawksworth S.* Thermal Radiation from Fireballs on Failure of Liquefied Petroleum Gas Storage Vessels. Symposium Series № 147. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582000708706> (дата обращения: 03.07.2018).

17. *Dorofeev S.B., Sidorov V.P., Efimenko A.A.* Fireballs from Deflagration and Detonation of Heterogeneous Fuel-rich Clouds// Fire Safety Journal. — 1995. — Vol. 25. — P. 323–336.

18. *Yamaguchi T., Wakasa K.* Oil Pool Fire Experiment. URL: [http://iafss.org/publications/fss/1/911/view/fss\\_1-911.pdf](http://iafss.org/publications/fss/1/911/view/fss_1-911.pdf) (дата обращения: 03.07.2018).

19. *The Phoenix Series Large Scale LNG Pool Fire Experiments/ T. Blanchat, P. Helmick, R. Jensen et al. [A. Luketa, R. Deola, J. Suo-Anttila, J. Mercier, T. Miller, A. Ricks, R. Simpson, B. Demosthenous, S. Tieszen, M. Hightower].* URL: <https://prod.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2010/108676.pdf> (дата обращения: 03.07.2018).

20. *Mudan K.S.* Hydrocarbon Pool and Vapour Fire Data Analysis// USDOE Report DE-AC01-83EP16008, 1984. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/> (дата обращения: 03.07.2018).

**bannikov@safety.ru**

*Материал поступил в редакцию 18 июля 2018 г.*

**«Bezопасnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2018, № 8, pp. 7–14.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-7-14**

**Verification of TOXI+Risk 5 Software Package with Regard to Modeling of the Pool Fire Combustible Liquids and the «Fire ball»**

**A.A. Agapov**, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Computational Analysis Center

**A.S. Sofyin**, Cand. Sci. (Eng.), Department Head

**S.Kh. Zainetdinov**, Junior Researcher

**V.V. Bannikov**, Junior Researcher, [bannikov@safety.ru](mailto:bannikov@safety.ru)

**STC «Industrial Center» CJSC, Moscow, Russia**

## Abstract

The current state of the foreign and native practice of the methods of quantitative risk assessment is considered, their qualitative differences are shown. Substantiation of the conducted verification is presented for the objective to confirm the adequacy of the approaches used in TOXI + Risk 5 software package.

Verification of methods is conducted with regards to the consequences assessment of the «fire ball» and the pool fire formation, which are used in Russia at calculating fire risk and accident risk by comparing the results of the calculations with the published source data from the field experiments conducted at the end of the 20th century, including: a number of experiments with the destruction of the tank containing different amount of the liquefied natural gas, accompanied by the Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) and the «Fire ball»; a number of experiments with the formation of the «Fire ball» as a result of an explosion of the explosive charge in the vessel with gasoline, kerosene and diesel fuel; a number of experiments with the pool fire of the kerosene on the surface of the water basin; a number of experiments «Phoenix» with pool fire of the liquefied natural gas on the water surface; a number of the experiments on the China Lake with the pool fire of liquefied natural gas.

Satisfactory agreement of the calculated and experimental data for practically all the experiments listed is shown.

The need is shown regarding the improvement of the methods for modeling the pool fire with regard to taking into account the spread of the pool fire along the terrain relief, as well as the possibility of specifying an arbitrary shape of the radiation surface.

To increase confidence in the methods of modeling physical processes used in the native regulatory methodological documents, when published, it is proposed to place in the open access the appropriate reports on verification of these methods, including references to primary sources of the mathematical models and the results of comparison with experimental data.

**Key words:** accident risk assessment, quantitative risk assessment, fire risk, accident risk, hazardous factors, «Fire ball», pool fire, verification, methods, program, TOXI + Risk 5.

## References

1. General rules of explosion safety for explosion and fire hazardous chemical, petrochemical and oil refining plants: Federal norms and rules in the field of industrial safety. 3-e izd., ispr. i dop. Ser. 09. Iss. 37. Moscow: ZAO NTTs PB, 2018. 132 p. (In Russ.).

2. Technical regulations on fire safety requirements: Federal Law of July 22, 2008 № 123-FZ. Ser. 19. Iss. 1. Moscow: ZAO NTTs PB, 2017. 192 p. (In Russ.).

3. Witlox H.W.M., Harper M., Pitblado R. Validation of PHAST Dispersion Model as Required for USA LNG Siting Applications. Chemical Engineering Transactions. 2013. Vol. 31.

4. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. Available at: [https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS\\_Validation\\_Guide.pdf](https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS_Validation_Guide.pdf) (accessed: July 03, 2018).

5. Agapov A.A., Agapova E.A. Certification and verification of the software. *Bezопасnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 4. pp. 58–60. (In Russ.).

6. Abramov L.V., Bakhmetev A.M., Bylov I.A., Vasyuchenkov A.A. Development and verification of the software package for probabilistic analysis of nuclear installations safety in the area of design «Proryv». *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika = News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy*. 2016. № 1. pp. 5–12. (In Russ.).

7. Development and verification of the condensation model for CFD calculations of the problems of hydrogen safety for nuclear power plants. *Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. Energetika = News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2014. № 4. pp. 123–141. (In Russ.).

8. On the Introduction of Changes to Article 26 of the Federal Law «On the Use of Nuclear Energy» and the acknowledgment of certain provisions of the legislative acts of the Russian Federation as invalid: Federal Law of May 23, 2018 № 118-FZ. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/557485199> (accessed: July 03, 2018). (In Russ.).

9. Agapov A.A., Bannikov V.V., Degtyareva E.A., Sumskey S.I. Database of full-scale experiments for verification of the mathematical models for dispersion of «heavy» gas clouds. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 6. pp. 35–44. (In Russ.).

10. Method for identification of the estimated fire risk values at the production facilities. Ser. 19. Iss. 2. Pt. 4. Moscow: ZAO NTTs PB, 2016. pp. 112–192. (In Russ.).

11. GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system (OSSS). Fire safety of the technological processes. General requirements. Methods of control. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed: July 03, 2018). (In Russ.).

12. Bosch Van Den C.J.H., Weterings R.A.P.M. Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases): Yellow Book. Available at: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (accessed: July 03, 2018).

13. Zinoveva O.M., Mastryukov B.S., Merkulova A.M., Ovchinnikova T.I., Seryanina A.V. Effect of the wind speed on affecting factors of the pool fire. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy = Problems of Safety and Emergency Situations*. 2017. № 1. pp. 13–19. (In Russ.).

14. Thomas P.H. The Size of Flames from Natural Fires. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.369.5324&rep=rep1&type=pdf> (accessed: July 03, 2018).

15. Venart J.E.S. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE); Possible Failure Mechanisms and Their Consequences. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/286746489\\_Boiling\\_liquid\\_expanding\\_vapour\\_explosions\\_BLEVE\\_Possible\\_failure\\_mechanisms\\_and\\_their\\_consequences](https://www.researchgate.net/publication/286746489_Boiling_liquid_expanding_vapour_explosions_BLEVE_Possible_failure_mechanisms_and_their_consequences) (accessed: July 03, 2018).

16. Roberts T., Gosse A., Hawksworth S. Thermal Radiation from Fireballs on Failure of Liquefied Petroleum Gas Storage Vessels. Symposium Series № 147. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582000708706> (accessed: July 03, 2018).

17. Dorofeev S.B., Sidorov V.P., Efimenko A.A. Fireballs from Deflagration and Detonation of Heterogeneous Fuel-rich Clouds. *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 25. pp. 323–336.

18. Yamaguchi T., Wakasa K. Oil Pool Fire Experiment. Available at: [http://iafss.org/publications/fss/1/911/view/fss\\_1-911.pdf](http://iafss.org/publications/fss/1/911/view/fss_1-911.pdf) (accessed: July 03, 2018).

19. Blanchat T., Helmick P., Jensen R., Luketa A., Deola R., Suo-Anttila J., Mercier J., Miller T., Ricks A., Simpson R., Demosthenous B., Tieszen S., Hightower M. The Phoenix Series Large Scale LNG Pool Fire Experiments. Available at: <https://prod.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2010/108676.pdf> (accessed: July 03, 2018).

20. Mudan K.S. Hydrocarbon Pool and Vapour Fire Data Analysis. USDOE Report DE-AC01-83EP16008, 1984. Available at: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/> (accessed: July 03, 2018).

Received July 18, 2018

## ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН «О ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»

20-Е ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



Приведен текст Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» с изменениями, внесенными федеральными законами от 10.01.2003 № 15-ФЗ, от 22.08.2004 № 122-ФЗ, от 09.05.2005 № 45-ФЗ, от 18.12.2006 № 232-ФЗ, от 30.12.2008 № 309-ФЗ, от 27.12.2009 № 374-ФЗ, от 23.07.2010 № 171-ФЗ, от 27.07.2010 № 226-ФЗ, от 01.07.2011 № 169-ФЗ, от 18.07.2011 № 242-ФЗ, от 18.07.2011 № 243-ФЗ, от 19.07.2011 № 248-ФЗ, от 28.11.2011 № 337-ФЗ, от 30.11.2011 № 347-ФЗ, от 25.06.2012 № 93-ФЗ, от 04.03.2013 № 22-ФЗ, от 02.07.2013 № 186-ФЗ, от 31.12.2014 № 514-ФЗ, от 13.07.2015 № 233-ФЗ, от 02.06.2016 № 170-ФЗ, от 03.07.2016 № 283-ФЗ, от 22.02.2017 № 22-ФЗ, от 07.03.2017 № 31-ФЗ, в редакции, действующей с 25.03.2017.

**ЭТУ КНИГУ И ДРУГИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ МОЖНО ПРИОБРЕСТИ ПО АДРЕСУ:**

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а также заказать в отделе распространения по тел/факсам: +7(495) 620-47-53 (многоканальный), +7(495) 620-47-47, +7(495) 620-47-46. E-mail: ornd@safety.ru.

Реклама