

УДК 614.8

## Неопределенности количественной оценки риска аварий на нефтегазовых объектах

М.В. Лисанов<sup>1\*</sup>, С.И. Сумской<sup>2</sup>, А.А. Швыряев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», Российская Федерация, 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

<sup>3</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

\* E-mail: risk@safety.ru

**Тезисы.** Статья посвящена количественной оценке риска аварий (КОР), применяемой для целей обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО). Рассматриваются источники, факторы и методы оценки неопределенностей КОР. Представлены примеры оценки неопределенностей КОР для типовых нефтегазовых ОПО. Проанализированы «консервативные» (т.е. заведомо завышающие опасности) допущения моделей аварийных процессов, представленных в нормативных методиках КОР, утвержденных Ростехнадзором. Сделан вывод, что для большинства задач промышленной безопасности (оптимизации размещения ОПО и компоновки оборудования, оценки безопасных расстояний и последствий аварии) таких допущений достаточно для достоверности результатов КОР.

**Ключевые слова:** авария, безопасность, взрыв, допущение, методика, риск, консерватизм, неопределенность.

Методология количественной оценки (количественного анализа) риска (далее – КОР), широко применяемая при декларировании промышленной безопасности, обосновании безопасности опасных производственных объектов (ОПО) и расчетах пожарного риска, является, тем не менее, одной из самых обсуждаемых тем в области промышленной безопасности [1–11]. Известны ограничения методологии КОР для оценки промышленной безопасности, связанные в том числе с неопределенностью расчетов. Так, некоторые показатели риска аварий, полученные семью независимыми группами специалистов в рамках эксперимента по страхованию на примере хранилища аммиака, отличались друг от друга на два–четыре порядка [9]. В частности, частоты таких событий, как разрыв подводящего трубопровода, полное разрушение цистерны и авария с гибелью не менее 10 чел., попали соответственно в интервалы  $2 \cdot 10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,5 \cdot 10^{-9} \dots 2,3 \cdot 10^{-7}$  и  $2 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$  и более случаев в год. Также наблюдался 10-кратный разброс оценок удаленности от ОПО (в данном случае хранилища), обеспечивающей достижение заданного уровня риска: минимальные, средние и максимальные оценки расстояния до ОПО, которое отвечает достижению равной  $10^{-5}$  год<sup>-1</sup> частоты гибели человека, составили соответственно 125, 615 и 1310 м.

Упомянутый эксперимент более чем 15-летней давности в последнее время обсуждался в контексте развития методик оценки риска [10, 11]. Некоторые специалисты ссылаются именно на эти результаты [9], когда приводят доводы против применения КОР в промышленной безопасности или обосновывают принципиальные недостатки существующих методик КОР. Однако следует отметить, что опубликованный отчет К. Лоридзена и др. [9] не содержит ни описания примененных моделей, ни анализа причин разброса полученных оценок. Вполне возможно, что такими причинами могли стать низкая квалификация либо ошибки некоторых исполнителей, а также неадекватные модели. Наконец, для сопоставимости моделей расчета показателей риска принципиальным является использование одинаковых начальных данных, а в эксперименте 2002 г. [9] в качестве начальных данных заведомо использовались различные данные по частотам разгерметизации оборудования. Понятно, что при таком подходе не стоит удивляться расхождению конечных результатов на порядки, когда такое же расхождение заложено уже в начальных данных. В этой связи неопределенность КОР следует оценивать исходя из уровней достоверности и неопределенности как

минимум двух элементов – собственно исходных данных и моделей (используемых вычислительных процедур). Не следует качественно обобщать эти показатели, а также переносить некорректные допущения в отношении любого из этих элементов на всю процедуру КОР.

При этом, строго говоря, для целей обеспечения безопасности (в отличие от, например, метрологии) часто неважно знать «истинное» – точное – значение показателя риска, а необходимо лишь подтверждение выполнения определенных критериев, в том числе критериев допустимого риска, например, при обосновании минимальных допустимых расстояний. В этом контексте особо важной становится оценка неопределенности, связанной с вычислительной процедурой (естественно, при сохранении усилий по получению достоверных статистических данных и участию квалифицированных исполнителей). Таким образом, исследование неопределенностей является актуальной задачей с точки зрения дальнейшего совершенствования методического обеспечения КОР.

Рассмотрим более подробно эти вопросы исходя из практики КОР, состояния нормативных методик Ростехнадзора<sup>1</sup> [2] и исследований в этой области.

### Основные источники неопределенностей

В метрологии неопределенность измерения отражает тот факт, что для данного измерения имеется не единственное, а бесконечное число значений, рассеянных вокруг результата, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине [12], и в такой постановке неопределенность обычно относят на счет исходных статистических данных. Неопределенность также можно трактовать как меру разброса получаемых результатов [4], и тогда источниками неопределенности считают как разброс исходных данных, так и вычислительные процедуры. Близким к понятию неопределенности в последней трактовке является понятие чувствительности, т.е. зависимость некоторого результирующего показателя от вариаций значений показателей, участвующих в его определении.

Перечисленные метрологические подходы легли в основу требований Ростехнадзора

к учету неопределенностей оценок риска<sup>2</sup>. Например, в п. 42 РД-03-14-2005 указано, что при изложении результатов оценки риска аварии следует указать влияние исходных данных и принятых допущений на рассчитываемые показатели риска. Однако необходимо иметь в виду коренное отличие применения КОР в промышленной безопасности от метрологических оценок. При оценке безопасности всегда используется негласный принцип: любое сомнение в тех или иных вариантах обеспечения безопасности следует толковать в пользу завышения опасности, т.е. выбирать более консервативный вариант (оценки «сверху» или по принципу «не хуже, чем...»). Таким образом, основным способом «борьбы» с неопределенностью в задачах обеспечения безопасности является консервативность допущений, т.е. положений, заведомо завышающих риск.

Анализ практикуемых подходов к проблеме КОР позволяет выделить следующие источники неопределенностей:

- неопределенность исходной информации (статистики аварийных выбросов и воспламенения опасных веществ (ОВ), метеорологических характеристик, данных о форме рельефа, размещении и поведении людей и т.д.);
- неопределенность моделей (например, процессов рассеяния, воспламенения/взрыва, критериев поражения);
- ошибки исполнителей при расчетах, в том числе при использовании программных средств.

Недостаточность исходных данных об объекте и его окружении (первый источник неопределенностей) является естественной для стадии разработки проектной документации (особенно на предпроектной стадии). Неопределенность моделей можно отнести к несовершенству методического обеспечения КОР в том числе по причине ограниченности наших знаний о природе различных физических явлений; ошибки исполнителей объясняются их низкой квалификацией и недостатками обучения.

<sup>2</sup> См. РД-03-14-2005. Порядок оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов и перечень включаемых в нее сведений (с изменениями) / утв. приказом Ростехнадзора от 29.11.2005 № 893, зарегистрирован Минюстом России 17.01.2006 № 7375; см. также Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». – М.: НТЦ ПБ, 2016. – Сеп. 27. – Вып. 8. – 75 с.

<sup>1</sup> Актуализированный перечень см. на <https://www.safety.ru/deklaraciya-promishlennoi-bezopasnosti>.

Существенную неопределенность вносит и такой фактор, как способ описания свойств и состояния веществ, особенно при аварийных процессах. Вообще, в науке общим подходом к таким задачам является использование законов термодинамики или кинетики в сочетании с реальными свойствами индивидуальных веществ: термодинамика позволяет рассчитать те равновесные состояния (например, по давлению и температуре), в которые может прийти система. В результате таких расчетов вычисляются значения давления, температуры, плотности и иных параметров смеси известного состава при любой известной паре значений термодинамических параметров (давление – энтальпия, плотность – внутренняя энергия и т.д.). Например, для расчета состояния продуктов взрыва газового облака (давления и температуры) нужно решить термодинамическую задачу с заданной плотностью (это начальная плотность облака) и заданной энергией (это начальная внутренняя энергия облака, включая теплоту сгорания). Кинетика позволяет определить не только конечное состояние, в которое перейдет система, но и все промежуточные

состояния, через которые она пройдет. В настоящее время в практике решения задач промышленной безопасности такие подходы почти не используются. Вместо этого могут применяться упрощения, например, такого типа, как постоянство температуры при испарении капель и т.д. При этом сам факт учета конденсации (или испарения) чрезвычайно важен, поскольку конденсация (равно как и испарение капель) существенно влияет на плотность облака, что в свою очередь в значительной мере определяет характер рассеяния. Например, нагретые до температуры выше температуры кипения и находящиеся при избыточном давлении пары таких веществ, как метанол, дизельное топливо, бензин, могут при выбросе в атмосферу и смешении с воздухом конденсироваться и изменять плотность смеси, переходя в различные состояния. Однако данный факт не всегда корректно учитывается при моделировании задач промышленной безопасности.

Перечислим еще некоторые допущения, связанные с неопределенностью, которые отражены в методиках КОР или допускаются на практике (таблица).

#### Анализ допущений при КОР

Область допущений	Допущение	Влияние допущения	Примечание
Оценка поражения людей	Равномерное распределение людей по территории	Завышение количества пострадавших	Причина – отсутствие исходных данных
	100%-ное смертельное поражение людей, попадающих в облако пожара, вспышки	Завышение количества погибших и показателей риска	–
	Расчеты без учета действий и защищенности людей, например, наличия спецодежды	Завышение количества погибших	–
	Неопределенность в выборе длительности негативного воздействия, в том числе экспозиции при расчете токсического воздействия	Например, общепринятое на практике допущение о 10...30-минутной экспозиции приводит к существенному завышению числа погибших	Необходимо уточнение длительности периодов воздействия в методиках по оценке последствий выброса токсичных веществ
	Неучет передвижения людей, в том числе их выхода из зоны поражения	Завышение и количества пострадавших, и показателей гибели людей	Причина в использовании допущения о неготовности людей к адекватным действиям при аварийных процессах
Последствия выброса ОВ	Неопределенность массовой доли ОВ, участвующей во взрыве (от 10 % массы облака, участвующей в аварии, до 100 % массы выброса)	Завышение радиуса зоны поражения в 1,5...3 раза	–
	5-кратный расход ОВ из смежных трубопроводов при разрыве основного технологического оборудования	Завышение массы облака ОВ и зон поражения	–

Область допущений	Допущение	Влияние допущения	Примечание
Последствия выброса ОВ	Неучет препятствий, ограждений при рассеянии «тяжелого» газа	Завышение радиусов зон поражения	–
Рассеяние газообразных ОВ в атмосфере	Неучет изменения направления ветра при рассеянии	Завышение максимального расстояния рассеяния и радиуса зоны поражения	Переменность ветра ускоряет рассеяние облака ОВ
	Неучет начального разбавления выброса	Завышение максимального расстояния рассеяния и радиуса зоны поражения	
Разлив жидких ОВ по рельефу местности	Допущение о наличии ровной поверхности на местности и равномерном разливе с определенной толщиной слоя жидкости	Высокая неопределенность площади разлива для реальной пересеченной местности, особенно для трубопроводных систем	Необходимо учитывать рельеф экспертно или проводить специальные расчеты, например, с помощью программного обеспечения геоинформационных технологий (ArcView и др.)
Вероятность воспламенения, взрыва	Условная вероятность воспламенения ОВ, нефти, мазута, дизельного топлива, принимаемая равной 0,1...0,2	Завышение вероятности воспламенения в несколько раз	Для более точных расчетов необходимо более полно учитывать свойства ОВ
	Условие инициирования взрыва в момент достижения наибольшей массы облака топливно-воздушной смеси (ТВС)	Завышение радиусов зон поражения	При необходимости более точных расчетов следует использовать распределение источников воспламенения по территории ОПО*
Критерии поражения / разрушения	Оценка риска разрушения здания по величине предельного давления на фронте падающей ударной волны без учета импульса	Учет величины импульса при оценке риска разрушения зданий уменьшает безопасные расстояния	Для снижения консервативности необходимо располагать данными о предельных значениях импульса для рассчитываемых зданий**
Пренебрежение температурной зависимостью свойств веществ; упрощенные термодинамические подходы	Постоянство свойств веществ, нахождение смеси «жидкость-пар» при постоянной температуре (температуре кипения) и т.д.	Искажение значений термодинамических параметров (плотности, температуры и т.д.)	Причина – отсутствие адекватных методологических подходов к термодинамическому описанию смесей
Применение новых материалов повышенной прочности и пластичности для трубопроводов	Допущение о «хрупком» разрушении трубопроводов с образованием протяженных трещин и «гильотинного разрыва»	Завышение частоты полного разрушения трубопроводов и последствий аварий	–

\* См. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей» / утв. приказом Ростехнадзора от 17.09.2015 № 366; см. также СТО Газпром 2.2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».

\*\* См. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» / утв. приказом Ростехнадзора от 31.03.2016 № 137. – Табл. 3.

На основе всего изложенного можно выделить некоторые факторы, задающие неопределенность КОР, в порядке убывания значимости их влияния на показатели риска в случае априорного предположения о достаточной точности используемых методик и критериев поражения, а именно:

- разброс статистических данных о выбросах ОВ из оборудования, в том числе о размерах дефектных отверстий;

- выбор разных значений вероятностей воспламенения;
- учет нестационарности аварийных процессов (переменные во времени скорость истечения, размеры пролива, перемещение людей при аварии и т.д.);
- отсутствие достоверных данных о метеоусловиях аварии;
- неопределенность размеров пролива жидкой фракции ОВ;

- сложности оценки технического состояния оборудования вследствие отсутствия соответствующей информации (для оценки риска на стадии эксплуатации ОПО).

В большинстве случаев не всегда удается спрогнозировать степень консервативности допущений. Тем не менее можно констатировать, что для большинства ОПО расчетные значения риска гибели людей при авариях завышены, что, учитывая экономические аспекты безопасности, в том числе «избыточность нагрузки на бизнес», ставит в том числе задачу снижения консервативности результатов. Игнорирование консервативности большинства расчетов при КОР путем применения дополнительных «коэффициентов запаса», например, при установлении величин допустимого риска [11], может приводить к существенному и необоснованному ужесточению требований безопасности.

Исходя из опыта КОР неопределенность расчетов также зависит:

- от стадии жизненного цикла (наибольшая консервативность вначале, наименьшая при эксплуатации ОПО);
- рассчитываемого показателя риска (учитывая, что разброс результатов вычислений растет при увеличении количества задействованных переменных, то наибольшая неопределенность достигается при расчете ожидаемого ущерба, наименьшая – расчете потенциально-го риска).

Следует также учитывать, что исходя из сравнения расчетов с фактическими данными и зарубежными программами качество (проработанность) большинства нормативных методик КОР достигло вполне приемлемого уровня. Поэтому расчеты по нормативным методикам для большинства типовых ОПО (в том числе по хранению ОВ), предприятий нефтегазопереработки, магистральных трубопроводов, не должны давать большого разброса основных показателей риска.

Проиллюстрируем перечисленные тезисы примерами КОР для типовых нефтегазовых объектов.

### Неопределенность частоты разгерметизации оборудования

Неопределенность исходной частоты разгерметизации оборудования при оценке риска двухцеховой компрессорной станции (КС) проанализирована в рамках статистических данных, приведенных в СТО Газпром 2-2.3-351-2009.

Предполагалось, что частоты выброса природного газа на типовых технологических элементах КС распределены по логнормальному закону с математическим ожиданием, указанным в табл. 7.1 названного стандарта. Для оценки дисперсии такого распределения использовали двойное распределение Стьюдента при условии, что количество аварий на газопроводах Ду700 (условный диаметр 700 мм) составляет до двух в год на участке длиной  $L = 11,5$  тыс. км. Тогда для трубопроводов Ду700 значения частот  $\lambda$  5%-ного и 95%-ного доверительных уровней значимости [13] для логнормального распределения самой частоты составят, аварий в год на 1000 км:

$$\lambda(95\%) = (N + 1) F1/L = 3 \cdot (2,10 / 11,5) = 0,548;$$

$$\lambda(5\%) = N / (L \cdot F2) = 2 / (11,5 \cdot 5,63) = 0,0309,$$

где  $N$  – число аварий на рассматриваемом объекте;  $F1, F2$  – параметры двойного распределения Стьюдента для  $N1 = N = 2, N2 = \infty$ . При этом логнормальное распределение частоты имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - m)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $x$  – аргумент распределения (в нашем случае – частота аварий);  $m$  – математическое ожидание распределения;  $\sigma$  – дисперсия распределения.

Это позволяет определить размах распределения  $\Delta(\lambda)$ :  $\Delta(\lambda) = \lambda(95\%) / \lambda(5\%) = 17,7$ . Для этого значения параметр  $\sigma$  в логнормальном распределении величины изменяется от 0,5 до 1. Интегрированием  $F(x)$  по  $x$  рассчитывается интегральное логнормальное распределение, из которого определяются  $\lambda(5\%)$  и  $\lambda(95\%)$  и  $\Delta(\lambda)$ . При этом если  $\sigma(\lambda) = 1$ , то  $\Delta(\lambda) = 27,1$ ; если  $\sigma(\lambda) = 0,5$ , то  $\Delta(\lambda) = 5,3$ . Базовое расчетное значение коллективного риска для КС при 100%-ном загорании выброса газа составило в самом консервативном случае  $3,9 \cdot 10^{-3}$  смертей в год для частот, указанных в табл. 7.1 СТО Газпром 2.2.3-351-2009.

Количественную оценку неопределенности проводили с применением метода статистических испытаний для двух значений дисперсии распределения  $\sigma = 0,5$  и  $\sigma = 1$  для всех опасных составляющих КС. Для каждой составляющей определяли  $m$  при заданном значении  $\sigma$ .

Из условия равной вероятности реализации значения интегрального распределения частоты определяли случайное значение  $y = \int F(x)dx$  от 0 до 1. Далее из интегрального распределения определяли частоту, которая соответствует этому значению  $y$  (рис. 1).

Определив все частоты аварий для всех опасных составляющих КС, рассчитывали характеристики риска для персонала. Результаты  $10^5$  статистических испытаний приведены на рис. 2: показана кривая  $F(R)$  – зависимость частоты реализации коллективного риска  $R$  от соответствующего распределения частот аварии

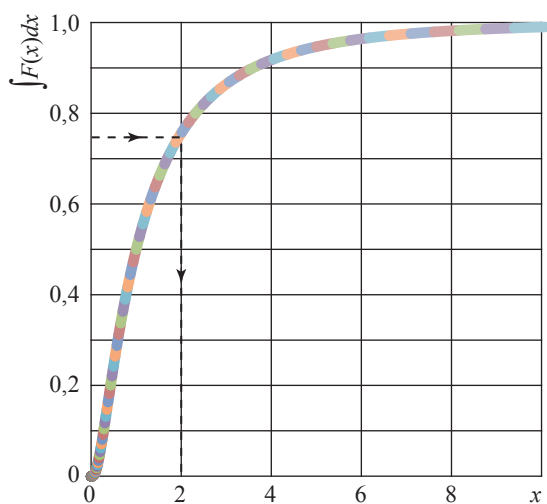


Рис. 1. Последовательность проведения оценок частоты методом Монте-Карло

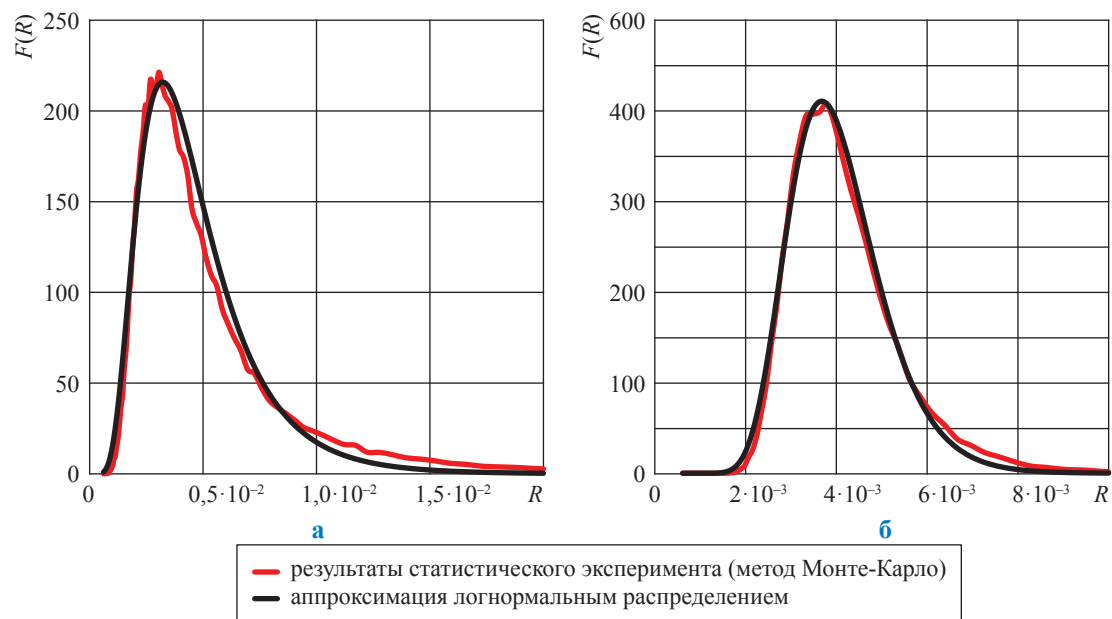


Рис. 2. Распределение коллективного риска КС при статистических испытаниях для частот разгерметизации технологических элементов КС в зависимости от дисперсии распределения частот:  $\sigma = 1$  (а);  $\sigma = 0,5$  (б)

на опасных составляющих КС. Полученное распределение коллективного риска аппроксимировали логнормальным распределением для определения  $\sigma(R)$  и  $\Delta(R) = R(95\%) / R(5\%)$ .

Рис. 2 показывает, что распределение коллективного риска весьма хорошо описывается логнормальным распределением. При аппроксимации полученных распределений логнормальным распределением получены следующие характеристики:

1) для частот при  $\sigma(\lambda) = 1$ : математическое ожидание риска  $\bar{R} = 4,1 \cdot 10^{-3}$  смертей в год; дисперсия распределения риска  $\sigma(R) = 0,505$  и размах вариации  $R(95\%) / R(5\%) = 2,83$ ;

2) для частот при  $\sigma = 0,5$ :  $\bar{R} = 3,9 \cdot 10^{-3}$  смертей в год;  $\sigma(R) = 0,256$ ;  $R(95\%) / R(5\%) = 1,94$ .

Таким образом, дисперсия распределения риска  $\sigma(R)$  для  $\sigma(\lambda) = 1$  примерно в 9,6 раза меньше по сравнению с дисперсией исходных данных по частотам аварий  $\Delta(\lambda) = 27,1$  (см. ранее), а для  $\sigma(\lambda) = 0,5$  (при  $\Delta(\lambda) = 5,3$ ) – в 2,7 раза. При этом параметр  $\sigma(R)$  распределения риска в 2 раза меньше параметра  $\sigma(\lambda)$  исходных распределений частот аварий на опасных составляющих КС.

### Неопределенности при оценке риска взрыва

Рассмотрим неопределенности на примере КОР взрыва облака ТВС для типового нефтегазохимического производства, где основные опасности связаны с обращением сжиженных

углеводородных газов. Для этого выделим следующие источники неопределенности сценария аварии:

- местоположение аварийного разрыва;
- его размер;
- состав ОВ;
- продолжительность и динамика выброса.

Применительно к расчетам дрейфа ТВС в атмосфере такими источниками неопределенности будут:

- характеристики окружающей среды;
- температура подстилающей поверхности;
- ограничения модели и граничных условий и т.п.

Соответственно, применительно к оценке последствий взрыва – это:

- различная уязвимость зданий и сооружений;
- оценки полученных характеристик ударной волны и импульса взрыва;
- территориальное распределение зданий и сооружений по территории комплекса.

С целью уменьшения затрат на оценку неопределенности анализа риска используем консервативный подход, при котором, если параметр, влияющий на расчеты последствий, имеет определенное распределение, выбирается его верхнее значение на уровне 95 % от интегрального распределения этого параметра. Например, температура региона в разрезе года приравнивается к средней температуре наиболее жаркого месяца. Если методика расчета требует выбора вариантов, то выбирается обоснованно консервативный вариант.

Так, например, уменьшение количества градаций скорости ветра в 8-румбовой розе ветров с 14 (от 1 до 14 м/с – шаг 1 м/с) до четырех (1; 2; 5 и 10 м/с), когда для градации 2 м/с суммируются показатели частот для градаций 2; 3 и 4 м/с; для градации 5 м/с суммируются показатели частот для градаций 5; 6; 7; 8 и 9 м/с; для градации 10 м/с суммируются частоты ветра со скоростями  $\geq 10$  м/с, приводит к завышению показателей риска на 3...5 %.

Консервативное положение модели о взрывном превращении в момент максимального удаления облака ТВС с максимальным количеством ОВ, участвующего во взрыве, также является источником неопределенности. Так, анализ неопределенностей процедуры КОР взрывобезопасности показал, что данный подход можно считать обоснованно консервативным. Он не более чем в 2 раза завышает

показатели риска в рамках сделанных допущений о дрейфе облака и массе газа, участвующего во взрыве.

Неопределенности выбора варианта оценки взрывоопасной массы связаны с консервативностью модели рассеяния «тяжелого газа»<sup>3</sup>, которая разработана либо для постоянных, либо для мгновенных выбросов. Это затрудняет оценку взрывоопасной массы ОВ в реальных условиях, когда кроме мгновенного выброса возникают межаппаратные перетоки ОВ, а также поступление паров ОВ из лужи разлива. Поэтому предложено для варианта мгновенного выброса массу начального выброса консервативно увеличивать на величину массы паров ОВ, поступивших в облако ТВС за счет перетока из смежных аппаратов и испарения с поверхности в течение 12 с (12 с – это время отсечения аварийного блока, что примерно соответствует среднему времени достижения в облаке ТВС максимального значения массы ОВ, способной к взрывному превращению).

Влияние различий исходной статистики двух баз данных по частотам выброса ОВ, используемых в методиках Ростехнадзора и оценки пожарного риска<sup>4</sup>, рассмотрено для вариантов оценки массы ОВ, участвующей во взрыве, с учетом российских требований (доля массы, участвующей во взрыве  $Z = 0,1$ ) и зарубежных методик ( $Z = 0,33$ ).

В качестве базового (БВ) рассмотрен вариант с частотами, приведенными в методике расчета пожарного риска. Вариант 1 (В1) использует статистическую базу Ростехнадзора<sup>5</sup>, а вариант 2 (В2) аналогичен базовому, но предусматривает увеличение участвующей во взрыве

<sup>3</sup> См. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» / утв. приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 № 158.

<sup>4</sup> Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» / утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.03.2013 г. № 96.; Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах / утв. приказом МЧС России от 10.07.09 № 404, изменения утв. приказом МЧС России от 14.12.10 № 649; Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей» / утв. приказом Ростехнадзора от 17.09.2015 № 366.

<sup>5</sup> См. первый документ в сноске 4.

массы до  $Z = 0,33$ . На рис. 3 для одного из зданий рассматриваемого комплекса приведены частоты превышения давлением во фронте ударной волны заданных уровней ( $F/P$ -кривые).

Как показали расчеты, несмотря на то что исходные данные (размеры дефектных отверстий, исходные частоты выброса, участвующая во взрыве масса) отличаются в несколько раз, увеличение показателей риска по сравнению с БВ для В1 составило 20...25 %, для В2 – 50 %.

Неопределенности, связанные с недостатком информации, рассмотрены в контексте

учета при оценке риска взрыва кроме падающей волны избыточного давления, также и импульса этой волны (рис. 4). Учет выполнения двух критериев приводит к уменьшению показателей риска разрушения зданий, поскольку исключаются малые взрывы (вспышки), которые не дают нужного значения импульса взрывной волны. Численно уменьшение можно оценить на уровне ~ 40 % от значения, полученного для одного критерия превышения избыточного давления во фронте ударной волны.

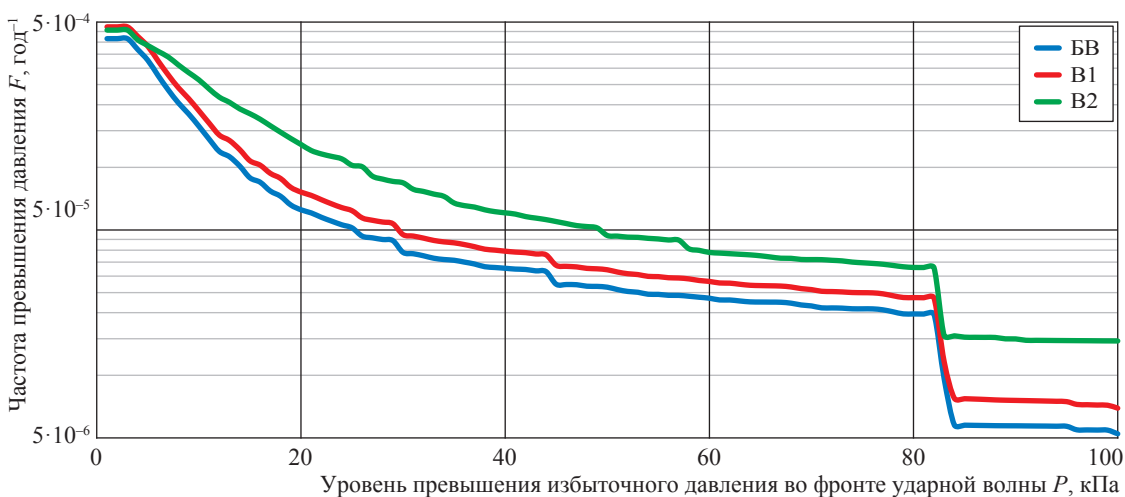


Рис. 3.  $F/P$ -кривые для трех вариантов оценки массы ОВ, участвующей во взрыве

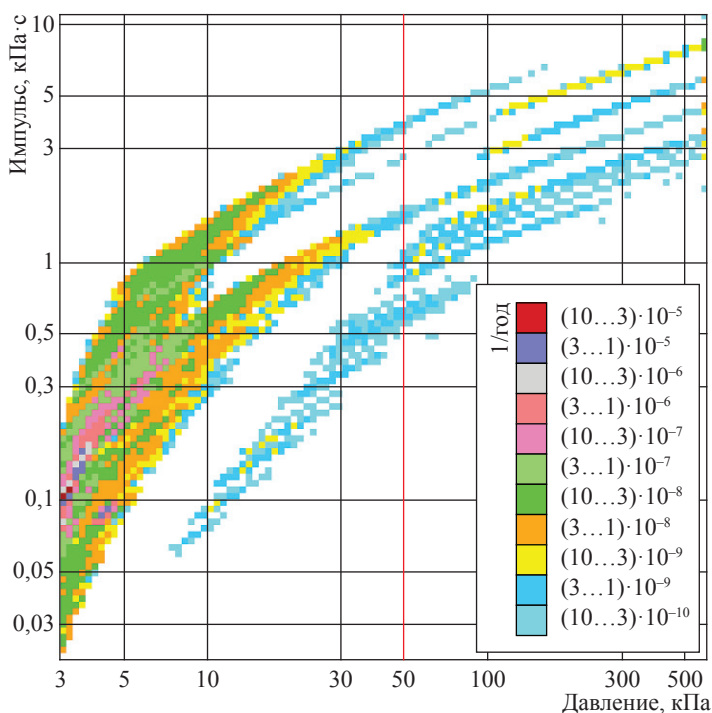


Рис. 4. Частоты реализации сценариев аварии со взрывом облаков ТВС для различных значений избыточного давления и импульса волны



\*\*\*

Проанализированы основные источники неопределенностей КОР аварий. Показано, что разброс (дисперсия) результатов, характеризующий неопределенность КОР, существенно зависит от целей и задач анализа риска, рассчитываемых показателей риска, полноты исходных данных, состояния нормативного обеспечения анализа риска, специфики и стадии жизненного цикла ОПО. Для большинства типовых ОПО дисперсия расчетов потенциального и индивидуального риска, выполненных по нормативным методикам Ростехнадзора при одинаковых исходных данных, не превышает половины порядка средней величины.

Во многих случаях большой разброс результатов расчетов обусловлен различной степенью консервативности допущений, изло-

женных в нормативных методиках и/или применяемых в практике КОР, что является естественным процессом моделирования аварийных процессов в условиях неполноты исходной информации и необходимости упрощения расчетов с целью исключения занижения уровней оцениваемых опасностей.

На основе анализа неопределенностей результатов расчетов основных показателей риска аварий, выполненных по нормативным методикам, изложены предложения по совершенствованию методического обеспечения КОР для ОПО нефтегазового комплекса.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 16-19-00188.*

## Список литературы

1. Жулина С.А. Изменения в Общих правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств / С.А. Жулина, М.В. Лисанов, В.В. Козельский // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 10. – С. 48–53.
2. Лисанов М.В. Методическое обеспечение и проблемы анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса / М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, С.И. Сумской и др. // Вести газовой науки: Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 1 (29). – С. 179–186.
3. Самсонов Р.О. Роль и место декларации промышленной безопасности в решении проблемы технического регулирования / Р.О. Самсонов, А.Б. Скрепнюк, С.В. Овчаров и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – № 9. – С. 34–40.
4. Колесников Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Ч. 1 / Е.Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 48–71.
5. Колесников Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Ч. 2 / Е.Ю. Колесников // Проблемы анализа риска. – 2013. – Т. 10. – № 3. – С. 8–31.
6. Колесников Е.Ю. Терминологическая неопределенность: опыт количественной оценки / Е.Ю. Колесников, Э.Ш. Теляков // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 82–88.
7. Uncertainty in industrial practice: a guide to quantitative uncertainty management / ed. by E. de Rocquigny, N. Devictor, S. Tarantola. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 2008. – 366 с.
8. Morgan M.G. Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis / M.G. Morgan, M. Henrion, M. Small. – Нью-Йорк: Cambridge University Press, 1990.
9. Lauridsen K. Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments / K. Lauridsen, I. Kozine, F. Markert et al. // The ASSURANCE project: final summary report. – 2002. – Ris0-R-1344(EN). – 49 с.
10. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска / М.В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 12. – С. 51–56.
11. Гражданкин А.И. Об установлении допустимых уровней риска аварии для оценки достаточности компенсирующих мероприятий в обосновании безопасности опасного производственного объекта нефтегазового комплекса / А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин, О.В. Николаенко // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 12. – С. 51–56.
12. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учеб. для вузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – 6-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
13. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. – 2-е изд. – Нью-Йорк: American Institute of Chemical Engineers, 2000. – 724 с.

## Uncertainties of the quantitative emergency risk assessment at oil-gas facilities

M.V. Lisanov<sup>1</sup>\*, S.I. Sumskoy<sup>2</sup>, A.A. Shvyryayev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CJSC “Scientific Technical Center of Industrial Safety Problems Research”, Bld. 14, Est. 13, Perevedenovskiy pereulok, Moscow, 105082, Russian Federation

<sup>2</sup> MEPhI National Research University, Bld. 31, Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russian Federation

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Bld. 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

\* E-mail: risk@safety.ru

**Abstract.** The article discusses quantitative assessment of emergency risks (QAER) aimed at support of industrial security of dangerous production facilities (DPF). The sources and factors of QAER uncertainty together with the methods for its assessment are studied. Some examples of QAER uncertainty estimation in respect to the typical oil-gas DPFs are presented. Few “conservative” (i.e. deliberately overestimating danger) assumptions included into the accident models which are suggested by the standard QAEF procedures approved by Rostekhnadzor are analyzed. It is concluded that for most tasks of industrial security support (namely: optimization of DPFs and equipment allocation and composing, determination of safe distances, estimation of emergency aftereffects) these assumptions are enough to make QAER results valid.

**Keywords:** emergency, security, explosion, assumption, methods, risk, conservatism, uncertainty.

### References

- ZHULINA, S.A., M.V. LISANOV, V.V. KOZELSKIY. Revision of the “General Explosion Safety Requirements for Explosion-Hazardous Chemical, Petrochemical, and Petroleum Refining Processes” [Izmeneniya v Obshchikh pravilakh vzryvobezопасnosti dlya vzryvopozharоопасnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv]. *Bezопасnost Truda v Promyshlennosti*. 2016, no. 10, pp. 48–53. ISSN 0409-2961. (Russ.).
- LISANOV, M.V., A.S. PECHERKIN, S.I. SUMSKOY et al. Methodical ware and issues of emergency risk analysis at dangerous industrial facilities of the oil-and-gas complex [Metodicheskoye obespecheniye i problemy analiza riska avarii na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh neftegazovogo kompleksa]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2017, no. 1(29): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 179–186. ISSN 2306-8949. (Russ.).
- SAMSONOV, R.O., A.B. SKREPNYUK, S.V. OVCHAROV et al. Role and place of an industrial safety declaration in solving problems of technical state control [Rol i mesto promyshlennoy bezопасnosti v reshenii problem tekhnicheskogo regulirovaniya]. *Bezопасnost Truda v Promyshlennosti*. 2007, no. 9, pp. 34–40. ISSN 0409-2961. (Russ.).
- KOLESNIKOV, Ye. Yu. Quantitative assessing uncertainty of man-caused risk [Kolichestvennoye otsenivaniye neopredelennosti tekhnogennogo riska]. Pt. 1. *Problemy Analiza Riska*. 2013, vol. 10, no. 2, pp. 48–71. ISSN 1812-5220. (Russ.).
- KOLESNIKOV, Ye. Yu. Quantitative assessing uncertainty of man-caused risk [Kolichestvennoye otsenivaniye neopredelennosti tekhnogennogo riska]. Pt. 2. *Problemy Analiza Riska*. 2013, vol. 10, no. 3, pp. 8–31. ISSN 1812-5220. (Russ.).
- KOLESNIKOV, Ye. Yu., E. Sh. TELYAKOV. Terminological uncertainty: practice of quantitative assessment [Terminologicheskaya neopredelennost: opyt kolichestvennoy otsenki]. *Bezопасnost Truda v Promyshlennosti*. 2016, no. 7, pp. 82–88. ISSN 0409-2961. (Russ.).
- ROCQUIGNY, E., de, N. DEVICTOR, S. TARANTOLA (eds.) *Uncertainty in industrial practice: a guide to quantitative uncertainty management*. N.-Y.: John Wiley & Sons, 2008.
- MORGAN, M.G., M. HENRION, M. SMALL. *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. N.-Y.: Cambridge University Press, 1990.
- LAURIDSEN, K., I. KOZINE, F. MARKERT et al. Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. *The ASSURANCE project: final summary report*. 2002. Ris0-R-1344(EN).
- LISANOV, M.V. On technical regulation and criteria of acceptable risk [O tekhnicheskoy regulirovani i kriteriyakh priyemlego riska]. *Bezопасnost Truda v Promyshlennosti*. 2017, no. 12, pp. 51–56. ISSN 0409-2961. (Russ.).
- GRAZHDANKIN, A.I., A.S. PECHERKIN, O.V. NIKOLAYENKO. On determination of acceptable emergency risk levels for evaluation of compensating measures sufficiency in safety substantiation of a dangerous industrial oil-gas facility [Ob ustanovlenii dopustimykh urovney riska avarii dlya otsenki dostatochnosti kompensiruyushchikh meropriyatii v obosnovanii bezопасnosti opasnogo proizvodstvennogo obyekta neftegazovogo kompleksa]. *Bezопасnost Truda v Promyshlennosti*. 2017, no. 12, pp. 51–56. ISSN 0409-2961. (Russ.).
- YAKUSHEV, A.I., L.N. VORONTSOV, N.M. FEDOTOV. *Exchangeability, standardization and technical measurements* [Vzaimozamenyayemost, standartizatsiya i tekhnicheskiye izmereniya]. 6<sup>th</sup> ed., revised. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. (Russ.).
- AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. 2<sup>d</sup> ed. New York, 2000.