

# Способы количественной оценки и уменьшения неопределенности аварийного риска взрывопожароопасных объектов

**Евгений Ю. Колесников**, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
Российская Федерация, Йошкар-Ола  
[e.konik@list.ru](mailto:e.konik@list.ru)



Евгений Ю.  
Колесников

**Резюме.** С целью обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов в настоящее время, наряду с традиционным надзорным, применяется риск-ориентированный подход, являющийся значительно более гибким. Процедура количественной оценки аварийного риска опасных производственных объектов по существу является одной из процедур оценки соответствия, поскольку включает сравнение полученных в результате расчета (либо экспертизы) показателей риска с их нормативными значениями. **Целью** статьи является постановка проблемы неопределенности, сопутствующей всем этапам процедуры количественной оценки аварийного риска, краткий исторический экскурс, анализ ее типов и источников, описание подходов, применяемых для количественной оценки этой неопределенности. В настоящее время принято выделять терминологический, параметрический и модельный типы неопределенности, в статье приведены их примеры. Анализ показывает, что к ним следует добавить четвертый – вычислительный тип – вклад которого в ряде случаев может быть значительным. Показано, что в силу ряда обстоятельств, скалярные числа, обычно используемые для задания значений параметров физико-математических моделей аварийных процессов, на самом деле являются лишь маркерами интервалов, в которых может меняться их величина. Для учета неопределенности величины параметров аварийного риска в настоящее время используются вероятностные и детерминированные подходы, а также нечеткие числа.

**Методы.** Для целей количественной оценки неопределенности в статье используются методы интервального анализа. В наиболее общем случае без привлечения гипотезы о поведении величины параметра внутри диапазона его возможных изменений параметрическая неопределенность может быть задана интервальным числом. В таком случае все необходимые расчеты выполняются интервальными методами. Естественная (наивная) версия интервального анализа обладает серьезным недостатком, заключающимся в необоснованном увеличении ширины интервального числа, являющегося результатом интервальных расчетов, если один или несколько входных параметров модели входит в расчетное соотношение неоднократно, либо входные параметры функционально взаимозависимы. В современном интервальном анализе разработаны методы нивелирования этого эффекта, кратко описанные в статье. Показано, что при наличии статистической информации о поведении величины параметров в пределах интервалов их изменения результаты интервальных вычислений показателей аварийного риска могут быть значительно улучшены. Предложенный метод уменьшения вычислительной неопределенности количественной оценки аварийного риска в интервальной постановке проиллюстрирован на численном примере расчета показателей риска для сценария аварии «огненный шар». Приведены результаты интервального расчета индивидуального аварийного риска для взрывопожароопасного объекта «резервуар с легковоспламеняющейся жидкостью» тремя способами: а) наивным; б) с принятием мер по учету влияния взаимозависимости параметров; в) дополнительно, с учетом имеющейся статистической информации. **Выводы.** Интервальные методы позволяют не только учитывать наличие неопределенности у параметров аварийного риска, но и непосредственно количественно оценивать ее. Существуют эффективные способы нивелировать негативные особенности интервальных вычислений.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, аварийный риск, параметрическая неопределенность, интервальные методы расчета, минимизация вычислительной неопределенности.

**Для цитирования:** Колесников Е.Ю. Способы количественной оценки и уменьшения неопределенности аварийного риска взрывопожароопасных объектов // Надежность. 2020. №3. С. 61-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-3-61-67>

Поступила 16.06.2020 г. / После доработки 04.07.2020 г. / К печати 21.09.2020 г.

## Введение

Крупнотоннажный оборот опасных и особо опасных веществ, в том числе горючих, на опасных производственных объектах (ОПО) чреват неконтролируемыми выбросами и утечками, следствием которых могут быть взрывы и пожары, токсическое поражение людей и загрязнение больших территорий. Взрывы возможны и внутри производственного оборудования, если параметры технологического процесса выйдут за пределы безопасного диапазона.

Наряду с традиционным, надзорным подходом в обеспечении промышленной безопасности на протяжении последних двух десятилетий в России используется альтернативный подход, основанный на методологии анализа и количественной оценки риска аварий (КОР). Риск-ориентированный подход является значительно более гибким, дружественным к технологическим инновациям, нежели традиционный, поскольку, не накладывая ограничений на конкретные технические решения, вместо мелочной регламентации множества параметров конструкции и технологического процесса он требует лишь, чтобы величина ряда целевых показателей (индивидуального, социального риска аварии) не превышала нормативных значений, [1].

Процедура КОР ОПО по существу является одной из процедур оценки соответствия, поскольку включает сравнение полученных в результате расчета (либо экспертизы) показателей риска с их нормативными значениями.

Методология КОР зародилась и получила свое развитие практически одновременно в Старом (для объектов химической промышленности) и Новом Свете (объектов ядерного цикла и астронавтике). Уже на первом этапе применения методологии анализа риска было осознано, что многие параметры задачи (например, свойства опасного объекта и окружающей его обстановки) в реальных условиях варьируют, меняются в пределах некоторых диапазонов. Чтобы учесть эти вариации, на первых порах количественные оценки риска выполняли по самому консервативному сценарию, при котором количество опасного вещества, участвующего в аварии – наибольшее, метеоусловия и расположение объектов-мишеней в зоне поражения – самые неблагоприятные.

Однако со временем от консервативного подхода отказались, поскольку вероятность одновременного сочетания всех этих маргинальных условий слишком мала. В качестве альтернативы при оценке аварийного риска было предложено ориентироваться на «средние» величины параметров. С нашей точки зрения этот подход также неудовлетворителен, поскольку: а) создает опасную иллюзию получения «точной» оценки показателя риска; б) не позволяет оценить диапазон, в котором на самом деле меняется (или может находиться) величина показателя. Подобные изменения величины параметра принято называть и количественно оценивать его неопределенностью (параметрической).

## Типы неопределенности результатов количественной оценки риска

Неопределенность сопровождает все этапы процедуры КОР, как, впрочем, и любое математическое моделирование. Причины этого факта, отчасти объективные, отчасти – субъективные, проанализированы в [2]. Для целей количественной оценки неопределенности (КОН) аварийного риска и принятия мер по ее сокращению важно классифицировать неопределенность по происхождению. Принято различать терминологический, параметрический и модельный типы неопределенности. К этому ряду следует добавить вычислительную неопределенность, обусловленную особенностями применяемых при моделировании вычислительных методов.

*Терминологическая неопределенность* обусловлена не только нечетким, неоднозначным определением используемых терминов и понятий в Руководствах по КОР, но и различным их толкованием специалистами. Последнее обусловлено различным менталитетом людей – различиями в базовом образовании, стандартах и стереотипах профессиональной среды, в которой они живут и работают. Следует отметить, что терминологическая неопределенность (неоднозначное толкование термина, понятия, параметра) имеет, наряду с очевидным качественным, и ярко выраженный количественный аспект. Это можно видеть на примере параметра «длина пламени»  $L$  (пожара пролива, факела). Большая часть Руководств по КОР точного и однозначного толкования данного параметра не дает, что чревато серьезными различиями:

- а) « $L$  – усредненная высота (длина) пламени, м, [3];
- б) « $L_f$  – длина усеченного конуса (пламени факела), [3];
- в) « $L$  – видимая длина пламени, м, [4].

Между тем смысл этого параметра не так очевиден, как кажется, ситуация совершенно аналогична случаю с параметром «диаметр огненного шара»  $D_F$ . Дело в том, что следует различать понятия «видимая» длина пламени («видимый» диаметр шара) и понятие «размер области, эффективно излучающей в инфракрасном диапазоне». По данным CPR-14E [3] в случае пожара пролива заданная двумя этими способами величина  $L$  может различаться до трех раз! Только Руководство CCPS AICHЕ [4] четко указывает, что оно понимает под средней длиной пламени. Между тем данный параметр влияет на величину поражающего фактора аварии – интенсивность падающего на объект-мишень теплового потока  $I$ , кВт/м<sup>2</sup>.

*Параметрическая неопределенность* означает, что величине параметра модели (задачи) не может быть приписано точное (точечное, скалярное) значение. Это обусловлено тем, что величина параметра:

- а) либо объективно варьирует, как температура воздуха и скорость ветра (если ОПО расположен на открытой местности), или количество опасного вещества в аппарате в момент аварии и т.п., которые точно не известны;

б) либо принята в результате измерений, которые неизбежно сопровождаются измерительной неопределенностью;

в) либо приведена в справочной литературе в виде интервала;

г) либо из-за скудности имеющейся информации принята экспертно на основании аналогии, экстраполяции и т.п.

Параметрическая неопределенность, возникающая вследствие двух первых обстоятельств, называется стохастической (aleatory), природа ее объективна. Напротив, неопределенность, обязанная причинам в) и г), субъективна, ее называют эпистемической (epistemic). Объективная неопределенность принципиально неустранима, в то время как неопределенность эпистемическая может быть уменьшена, и это по возможности всегда следует делать.

*Модельная неопределенность* при выполнении КОР (и не только) возникает при использовании для описания Природы любых физико-математических, математических, имитационных и иных моделей. Очевидно, что поскольку любая модель упрощает, загроубляет моделируемый объект или процесс, имеет ограниченную область применимости, постольку результат моделирования всегда будет отличным от реальности. Это является фактом уже потому, что в рамках естественнонаучной парадигмы именно опыт принят в качестве основного критерия истинности теории, а из-за наличия измерительной неопределенности (по-старому – погрешности) результат расчета по самой совершенной модели никогда точно не совпадет с результатами эксперимента. При выполнении КОР ОПО в настоящее время используется несколько альтернативных моделей, описывающих протекание аварийных сценариев, формирование поражающих факторов аварии, вероятность причинения ущерба объектам-мишеням. Достаточно назвать хотя бы модели, рекомендуемые [3-6], хотя в авторитетной трехтомной монографии [7] подобных моделей приведено десятки. Неоднократно было показано, что различие результатов количественной оценки риска, полученных с помощью разного модельного инструментария, может достигать трех и более порядков величины.

Способов минимизации модельной неопределенности при выполнении КОР, как минимум, два:

1) традиционный для СССР, а теперь и современной России, при котором некоторая модель принимается в качестве эталонной и назначается нормативной, единственно разрешенной к применению при выполнении КОР;

2) разработка наиболее адекватной модели, экспериментально верифицированной с четко очерченной областью применимости.

Вычислительная неопределенность своим возникновением обязана приближенным методам решения модельных уравнений. Аналитическое решение модельных уравнений в настоящее время является экзотикой. Решения получают с помощью современных

прикладных программ на ЭВМ. Однако даже если все параметры модели заданы точно, представление величин в машинных кодах в виде чисел с плавающей запятой, подразумевающее неизбежное округление, отсечение членов ряда, остановка итерационного вычислительного процесса и т.д. порождают неопределенность приближенных вычислений. Еще один источник вычислительной неопределенности, обязанный своим происхождением особенностям интервальных расчетов, будет рассмотрен ниже.

Традиционное математическое моделирование оперирует с точечными, скалярными значениями параметров (как входных, так и параметров модели). И результат расчетов также принято представлять в виде скалярного числа. На самом деле с учетом перечисленных выше обстоятельств результат математического моделирования всегда представляет собой интервал. Разумеется, процедура КОР ОПО в рамках риск-ориентированного подхода не является исключением. Однако совершенно очевидно, что эти скалярные значения показателей риска на самом деле являются лишь маркерами интервалов, в которых в реальности может меняться их величина.

## Интервальное представление параметрической неопределенности

Действующее Руководство [8] по анализу и количественной оценке риска аварий на ОПО рекомендует оценивать неопределенность полученных показателей риска, однако не говорит о том, как это сделать. Между тем, как известно, существует несколько способов решения данной задачи: а) с использованием нечетких чисел; б) в вероятностной постановке; в) с помощью интервальных чисел.

Последний способ нам представляется наиболее универсальным, поскольку не требует привлечения каких-либо гипотез о поведении величины параметра внутри диапазона изменений, [2], что необходимо как при вероятностном описании неопределенности, так и при использовании нечетких чисел. Следует четко отдавать себе отчет в том, что вероятностное описание величины подразумевает наличие у нее функции распределения вероятности (в дифференциальной или интервальной форме). А последнее возможно только при наличии генеральной совокупности объектов заданного типа, при наличии статистической устойчивости, когда любые выборочные параметры стремятся к теоретическим вероятностным значениям при бесконечном увеличении объема выборки.

На реальных ОПО едва ли удастся обнаружить множество элементов, которые могли бы быть объединены в генеральную совокупность. Изготовленные различными предприятиями, имеющие различную историю нагрузок и обслуживания, даже такие простые элементы, как задвижки, на деле обладают существенно различающимися свойствами. Поэтому принятие для них, например, гипотезы о нормальном распределении прочности с за-

данным средним и стандартным отклонением, требует серьезного обоснования.

Значительно надежнее задать ту же величину интервальным числом (интервалом). Последнее будет означать, что величина параметра находится в установленных пределах, при этом ничего не утверждается о том, как она распределена внутри данного диапазона.

Задание величины параметров математических моделей интервалами адекватно их природе с учетом наличия у них неопределенности. К настоящему времени интервальный анализ (ветвь математики, оперирующая интервальными числами) получил значительное развитие и позволяет выполнять все необходимые для КОР расчеты и получать показатели риска в виде интервалов.

Подавляющая часть математических моделей, используемых в действующих Руководствах по количественной оценке аварийного риска, являются аналитическими (параметрическими). Поэтому вычисление показателей риска является задачей поиска области значений целевой функции, а в интервальной постановке – внешней оценки области значений.

Выполнение КОР в интервальной постановке как нельзя лучше соответствует цели КОИ, поскольку ширина полученных интервальных чисел непосредственно количественно оценивает их неопределенность. Для практиков ситуация облегчается тем обстоятельством, что к настоящему времени разработаны и представлены на рынке специальные программные продукты, поддерживающие интервальные вычисления. Одной из таких программ является INTLAB toolbox, разработанная профессором З.М. Румпом из Гамбургского института надежных вычислений. INTLAB – это интервальное приложение MATLAB, позволяющее производить вычисления с интервальными числами.

Очевидным достоинством интервальной формы выражения параметрической неопределенности является также возможность одновременного учета неопределенности различного типа:

- а) измерительной, традиционно выражаемой как среднее  $\pm$  измерительная неопределенность (по-старому  $\pm$  погрешность измерения);
- б) эпистемической, выраженной в форме интервалов;
- в) стохастической (при наличии функции распределения вероятности), заданной доверительными интервалами.

## Негативные особенности интервальных методов и способы их минимизации

Имеющийся опыт показывает, что если расчеты целевых показателей риска выполнять естественными (ранее называемыми наивными) интервальными методами, без принятия специальных мер по уменьшению вычислительной неопределенности, то в качестве результата нередко можно получить интервальные величины очень

значительной ширины, что лишает результат всякого практического смысла.

Отметим, что за последние десятилетия интервальный анализ усилиями отечественных и зарубежных специалистов получил значительное развитие, см. например [9–11]. Было показано, что некоторые трудные математические задачи решаются его методами успешнее, чем в рамках классической математики. Одновременно выявлены и исследованы проблемы, присущие исключительно интервальному анализу:

а) непропорциональное увеличение ширины результата расчетов в случаях, когда параметры расчетного выражения входят в него более одного раза;

б) аналогичное уширение результата в ситуации, когда эти параметры связаны функциональной зависимостью.

Для минимизации указанных негативных эффектов разработано несколько методов: метод дробления интервалов Раймона Мура (Ramon Moore), метод ветвей и границ, метод глобальной оптимизации и др.

## Способ уменьшения неопределенности целевых метрик риска в интервальной постановке с использованием информации о распределении величины параметров

В ситуации, когда имеется надежная, статистически устойчивая информация о распределении величины параметров внутри интервалов их изменений, имеется возможность существенно уменьшить неопределенность метрик риска. Это может быть сделано в развитие положения нормативной методики МЧС России [6], согласно которому величина индивидуального риска  $R$ , год<sup>-1</sup>, для работника при его нахождении на территории объекта, определяется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^I q_{im} P(i), \quad (1)$$

где  $P(i)$  – величина потенциального риска в  $i$ -ой области территории объекта, год<sup>-1</sup>;

$q_{im}$  – вероятность присутствия работника в  $i$ -ой области территории объекта.

Данную идею применим не только к дислокации персонала на территории ОПО, но и к другим параметрам задачи. Предположим, что на рассматриваемом ОПО имеются надежные статистические данные, согласно которым:

1)  $P_1$  времени (долей единицы) персонал находится на удалении  $X_1$  от центра рассматриваемого технологического блока (ТБ), оставшееся время  $P_2$  – на расстоянии  $X_2$ ;

2) масса  $m_0$  опасного вещества в технологическом блоке (ТБ), кг: а) в течение  $P_{m01}$  времени (долей единицы)  $m_{01} \in [\underline{m}_{01}; \overline{m}_{01}]$ ; б)  $P_{m02}$  времени  $m_{02} \in [\underline{m}_{02}; \overline{m}_{02}]$  и в)  $P_{m03}$  времени  $m_{03} \in [\underline{m}_{03}; \overline{m}_{03}]$ ;

3) по имеющейся метеорологической информации может быть восстановлена дискретная плотность вероятности распределения температуры атмосферного воздуха, что можно проиллюстрировать на конкретном примере. Согласно СП 131.13330.2012 [12] среднемесячные температуры атмосферного воздуха  $t_a$  в районе расположения некоего ОПО, °C: I – -12,1; II – -11,4; III – -4,6; IV – -4,7; V – 12,0; VI – 16,5; VII – 18,6; VIII – 16,1; IX – 10,3; X – 3,4; XI – -3,7; XII – -9,4. Введя обозначение  $T_a = t_a + 273,15$ , К, имеем  $T_a \in [261,05; 291,75]$  К. Выполнив внешнее округление границ интервала до целых чисел, получим  $T_a \in [261; 292]$  К.

Аппроксимируем средствами MATLAB годовой ход температуры [13] полиномом шестой степени, результаты представим на рис. 1.

Затем разобьем весь диапазон температур  $t_a$  на 31 подинтервал шириной 1 К и подсчитаем частоты  $n_j$  попадания температуры в эти подинтервалы ( $j = 1, 2, \dots, 31$ ). В качестве дискретной оценки вероятностей  $P_{Tj}$  распределения температуры воздуха в диапазоне [261; 292] К примем величины  $P_{Tj} = n_j / 31$  (очевидно, что условие нормировки  $\sum_{j=1}^{31} P_{Tj} = 1$  выполнено).

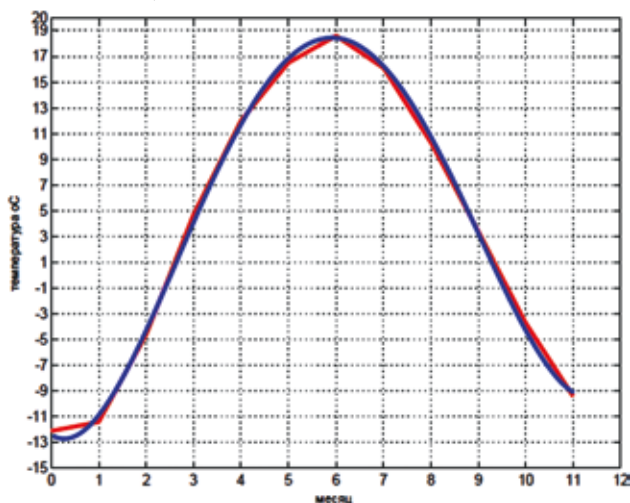


Рис. 1. Годовой ход температуры атмосферного воздуха:  
— по СП 131.13330.2012;  
— полиномиальная аппроксимация

Далее рассчитаем целевые метрики риска (например, индивидуальный риск  $R_{ijk}$ ) для всех сочетаний подинтервалов параметров ( $i = 1, 2$  – удаленность персонала от эпицентра аварии в момент аварии;  $j = 1, 2, \dots, 31$  – температура атмосферного воздуха;  $k = 1, 2, 3$  – количество опасного вещества в ТБ).

Рассматривая параметры  $X_i$ ,  $T_j$  и  $m_{0k}$  в качестве независимых случайных величин, целевую метрику (индивидуальный риск  $R_{инд}$ ) рассматриваемого технологического блока рассчитаем по соотношению

$$R_{инд} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{31} \sum_{k=1}^3 R_{ijk} P_{X_i} P_{T_j} P_{m_{0k}} \quad (2)$$

Выполненный данным методом с помощью INTLAB расчет индивидуального аварийного риска показал, что предложенный способ позволяет существенно уменьшить его неопределенность (ширину интервала).

### Пример оценки индивидуального аварийного риска предложенным способом для сценария огненного шара

Рассмотрим еще один пример использования предложенного способа. Как известно, одним из сценариев аварии резервуара, содержащего горючее вещество в жидкой фазе, является взрыв типа BLEVE. Подобный сценарий, как показывает статистика реальных аварий (см., например, [14]), может быть реализован в ситуациях, когда сферический резервуар или цилиндрическая емкость горизонтального типа с горючим веществом (СУГ, ЛВЖ) окажется в очаге пожара. Если приток тепла извне настолько велик, что истечение паровых струй через раскрытые клапаны резервуара не сможет предотвратить нарастание давления в его паровом пространстве, в какой-то момент резервуарная оболочка лопнет. В окружающее пространство будет выброшено капельно-паровое облако переобогащенной горючей смеси, которое мгновенно загорится по периферии и начнет всплывать в атмосфере, испуская мощный поток теплового излучения. Феноменологически «огненный шар» (ОШ) представляет собой ярко светящееся облако переменной формы, температура и мощность излучения которого непостоянна как во времени, так по поверхности. Однако в инженерной практике ОШ обычно упрощенно имитируют светящейся сферой, обладающей постоянной поверхностной интенсивностью инфракрасного излучения и всплывающей в атмосфере под действием сил плавучести.

В качестве целевого показателя риска данного сценария аварии рассмотрим индивидуальный аварийный риск – вероятность смертельного поражения персонала падающим тепловым потоком. Руководство по КОР CCPS of AIChE [4] предлагает для расчета параметров ОШ (диаметра  $D_{ОШ}$ , высоты расположения центра  $H_{ОШ}$  и продолжительности свечения  $t_{ОШ}$ ) эмпирические зависимости, являющиеся степенными соотношениями:  $D_{ОШ} = 5,8 \cdot m_0^{0,33}$ ;  $H_{ОШ} = 0,75 \cdot D_{ОШ}$ , где  $m_0$  – начальная масса горючего вещества в резервуаре, кг. Интересно отметить оригинальную особенность модели ОШ [4] – в ней расчетное соотношение для параметра  $t_{ОШ}$  зависит от величины  $m_0$ :

$$\text{а) при } m_0 < 30\,000 \text{ кг } t_{ОШ} = 0,45 m_0^{0,33}, \quad (3)$$

$$\text{б) при } m_0 > 30\,000 \text{ кг } t_{ОШ} = 2,6 m_0^{0,166}. \quad (4)$$

Для энергетической светимости  $E_f$  ОШ, возникших после BLEVE, по мнению CCPS of AIChE, типично  $E_f \in [200; 350]$  кВт/м<sup>2</sup>.



В аппроксимации ОШ точечным излучателем падающий на объект-мишень тепловой поток  $I$ , кВт/м<sup>2</sup>, может быть согласно [4] вычислен так:

$$I = E_f \tau_a \left( R_{\text{ОШ}} - \frac{D_{\text{ОШ}}}{2} \right) F_q, \quad (5)$$

где  $R_{\text{ОШ}}$  – расстояние от центра ОШ до объекта-мишени, м;

$\tau_a(X)$  – прозрачность атмосферного воздуха для потока инфракрасного излучения;

$F_q$  – геометрический фактор видимости для вертикальной поверхности (например, стоящего человека).

Поскольку поглощение в атмосфере теплового излучения обеспечивается в основном молекулами водяного пара, CCPS of AIChE рекомендует воспользоваться для оценки  $\tau_a$  корреляцией Питерсена и Хуэрта (Pietersen and Huerta)

$$\tau_a(X) = 2,02 (P_w X)^{-0,09}, \quad (6)$$

где  $P_w$  – парциальное давление водяного пара, Па;

$X$  – длина пути, пройденного в атмосфере лучом, м.

Для вычисления  $P_w$  при известных относительной влажности  $R_H$ , %, и температуре воздуха  $T_a$ , К, Мудан и Кроче (Mudan & Croce), предложили простую корреляцию, справедливую в диапазоне  $104 < P_w \cdot X < 105$  Н/м:

$$P_w = 1013,25 R_H \exp \left( 14,4114 - \frac{5328}{T_a} \right). \quad (7)$$

Относительную влажность воздуха в районе расположения ОПО зададим интервалом  $R_H \in [50, 85]\%$ .

Согласно [4] для расстояний  $X$ , превышающих радиус ОШ,  $F_q$  рассчитывается по формуле

$$F_q = \frac{X \left( \frac{D_{\text{ОШ}}}{2} \right)^2}{(X^2 + H_{\text{ОШ}}^2)^{3/2}}, \quad (8)$$

которая с учетом соотношения  $H_{\text{ОШ}} = 0,75 D_{\text{ОШ}}$  легко преобразуется к виду:

$$F_q = \frac{4\beta_x}{9(1 + \beta_x^2)^{3/2}}, \quad (9)$$

где  $\beta_x = \frac{X}{H_{\text{ОШ}}}$  – безразмерное расстояние.

Вероятность поражения человека тепловым излучением  $P_{\text{пор}}$  при выполнении КОР оценивают с помощью так называемой пробит-функции  $\text{Pr}$ . Данный подход, впервые предложенный Финни (Finney), пригоден для

описания отклика объекта на воздействие любого фактора случайной природы, если этот эффект подчиняется нормальному распределению вероятности, [4]. Зависимость  $P_{\text{пор}}(\text{Pr})$  может быть выражена через стандартную функцию ошибок:

$$P_{\text{пор}}(\text{Pr}) = 0,5 \left[ 1 + \text{erf} \left( \frac{\text{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (10)$$

Функцию  $\text{Pr}$  смертельного поражения человека тепловым потоком Руководство [4] рекомендует рассчитывать по соотношению:

$$\text{Pr} = -14,9 + 2,56 \cdot \ln \left( \frac{t_{\text{экс}} \cdot I^{4/3}}{10^4} \right), \quad (11)$$

где  $t_{\text{экс}}$  – продолжительность экспозиции, с (в случае ОШ  $t_{\text{экс}} = t_{\text{ОШ}}$ );

$I$  – интенсивность падающего на человека теплового потока ОШ, Вт/м<sup>2</sup>.

Очевидно, что если плотность падающего теплового потока  $I$  выразить в кВт/м<sup>2</sup>, то

$$\text{Pr} = -14,9 + 2,56 \cdot \ln (t_{\text{экс}} \cdot I^{4/3}), \quad (12)$$

Выполним в интервальной постановке оценку индивидуального аварийного риска поражения персонала некоего условного ОПО тепловым потоком ОШ:

$$R_{\text{инд}} = P_{\text{пор}} \cdot P_{\text{ав}}, \quad (13)$$

где  $P_{\text{ав}}$  – вероятность реализации данного сценария аварии, год<sup>-1</sup>.

Положим, что в рассматриваемом случае ОШ возникает после взрыва расположенного на его территории РГС-100 (резервуара горизонтального стального) с изопропиловым спиртом, попавшего в очаг пожара. Пусть вероятность  $P_{\text{ав}}$  оценена величиной  $P_{\text{ав}} \in [3,8; 5,7] \times 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>.

Далее, предположим, что:

- согласно надежным статистическим данным:

а) персонал ОПО, попадающий в зону поражения аварии: 1) в течение 25% времени ( $P_{x1} = 0,25$ ) находится на удалении  $X_1 \in [70; 80]$  м от резервуара, оставшееся время ( $P_{x2} = 0,75$ ) – на расстоянии  $X_2 \in [80; 100]$  м;

б) масса  $m_0$  изопропилового спирта в резервуаре: а) в течение 20% времени ( $P_{m01} = 0,2$ )  $m01 \in [30\,000; 40\,000]$  кг; б) 50% времени ( $P_{m02} = 0,5$ )  $m02 \in [40\,000; 50\,000]$  кг и в) 30% времени ( $P_{m03} = 0,3$ )  $m03 \in [50\,000; 60\,000]$  кг;

- среднемесячные значения температуры атмосферного воздуха в районе расположения ОПО соответствуют величинам, приведенным в предыдущем разделе.

Таблица. Результаты оценки индивидуального аварийного риска в интервальной постановке тремя способами

Значение параметра	Интервальный способ оценки		
	«наивный»	с принятием мер по учету влияния взаимозависимости параметров	дополнительно, с учетом имеющейся статистической информации
Величина индивидуального аварийного риска, год <sup>-1</sup>	$[0,0; 0,56] \times 10^{-4}$	$[0,0001; 0,54] \times 10^{-4}$	$[0,0034; 0,4] \times 10^{-4}$

Интервальный расчет индивидуального аварийного риска  $R_{инд}$  рассматриваемого сценария аварии для персонала ОПО, выполним с помощью INTLAB тремя способами: а) «наивным»; б) с нивелированием взаимозависимости параметров модели простейшим методом Р. Мура; в) с учетом имеющейся статистической информации (по соотношению (2)). Результаты расчетов отразим в итоговой таблице.

Анализ таблицы свидетельствует, что предложенные способы позволяют значительно улучшить результаты интервальных расчетов (сузить интервалы), уменьшив вычислительную неопределенность.

Наряду с описанными в статье существуют и иные методы (аффинная арифметика, метод глобальной оптимизации), позволяющие эффективно преодолеть неоправданное уширение результатов интервальных расчетов.

## Заключение

Интервальные методы расчета аварийного риска дают возможность не только учитывать неопределенность, присущую параметрам задачи, но и оперировать ею, позволяя количественно оценивать неопределенность целевых показателей задачи. В результате вычислений в интервальной постановке показатели риска также представлены интервалами, что совершенно естественно и адекватно ситуации с аварийной безопасностью реальных опасных объектов техносферы.

При этом расчеты в естественной (наивной) версии интервального анализа из-за ее специфических особенностей могут сопровождаться значительным непропорциональным ростом ширины интервала результата вычислений. На сегодняшний день разработаны эффективные способы поиска области значений интервальнозначных функций, позволяющие получить результаты, свободные от паразитного уширения.

В работе представлены результаты интервальных расчетов индивидуального аварийного риска одного из простых сценариев аварии тремя способами: а) естественным методом; б) с нивелированием связанности параметров модели; в) с использованием имеющейся надежной информации о поведении ряда параметров задачи внутри их интервалов. Показано, что второй и, особенно, третий методы позволяют существенно уменьшить ширину интервала целевого показателя аварийного риска.

## Библиографический список

1. Колесников Е.Ю., Теляков Э.Ш. О роли методологии анализа риска в управлении пожарной и промышленной безопасностью // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18. № 1. С. 285.
2. Колесников Е.Ю. Количественная оценка неопределенности пожарного риска. сценарий аварии «Пожар пролива ЛВЖ» // Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11. № 4. С. 52.

3. CPR-14E Methods for the calculation of Physical Effects: 3-rd. ed. The Hague, 2005.

4. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis: 2-nd ed. AIChE/CCPS, 2000.

5. World bank technical paper number 55. Techniques for Assessing Industrial Hazards. A Manual. Washington D. C., 1988.

6. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утв. Приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404 в ред. приказа МЧС России от 14.12.2010 г. № 649 «О внесении изменений в приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404».

7. Lee's Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 1-3. 3-rd ed. Elsevier, 2005.

8. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 11.04.2016. Сер. 27. Вып. 16. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 55 с.

9. Moore, Ramon E. Introduction to interval analysis / Ramon E. Moore, R. Baker Kearfott, Michael J. Cloud. Philadelphia, 2009.

10. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: «XYZ», 2019. URL: <http://www.nsc.ru/interval> (дата обращения 10.01.2020).

11. Хансен Э., Уолстер Дж.У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. Институт компьютерных исследований, 2012.

12. СП 131.13330.2012 Строительная климатология.

13. Зверев А.С., Кирюхин Б.В., Кондратьев К.Я и др. Курс метеорологии (физика атмосферы): учебное пособие. / Под ред. П.Н. Тверского. Л.: Гидрометеиздат, 1951.

14. Prugh R. W. Quantitative Evaluation of Fireball Hazards // Process Safety Progress. 1994. v. 13. № 2. p. 83.

## Сведения об авторе

**Колесников Евгений Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Российская Федерация, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, e-mail: e.konik@list.ru

## Вклад автора в статью

Статья написана Колесниковым Е.Ю. единолично. Ее идея принадлежит автору, все расчеты выполнены автором без чьего бы то ни было участия.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.