

УДК 614.849:331.45  
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-5-80-89>

ISSN 1812-5220  
© Проблемы анализа риска, 2022

# О необходимости учета неопределенности при количественной оценке техногенного риска

Колесников Е.Ю.,

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого,  
195251, Россия,  
г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, д. 29

## Аннотация

Количественная оценка техногенного риска традиционно выполняется в точечной постановке. Между тем в экспериментальной части естественных и технических наук давно принято учитывать наличие неопределенности и количественно ее оценивать. Пришло время учитывать наличие неопределенности и выполнять ее количественную оценку и при математическом моделировании, и, в частности, при выполнении количественной оценки техногенного риска. В статье приводится проект положения об анализе и количественной оценке неопределенности расчетных показателей техногенного риска.

**Ключевые слова:** риск-ориентированный подход; количественная оценка техногенного риска; неопределенность; количественная оценка неопределенности.

**Для цитирования:** Колесников Е. Ю. О необходимости учета неопределенности при количественной оценке техногенного риска // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 5. С. 80—89,  
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-5-80-89>

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

# On the Need to Account for Uncertainty in Quantification Technogenic Risk

**Eugenij Yu. Kolesnikov,**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Polytechnic str., 29,  
St. Petersburg, 195251, Russia

## Abstract

Quantitative assessment of technogenic risk is traditionally carried out in point setting. Meanwhile, in the experimental part of the natural and technical sciences, it has long been customary to take into account the presence of uncertainty and quantify it. It is time to take into account the presence of uncertainty and quantify it in mathematical modeling, in particular, when performing a quantitative assessment of technogenic risk. The article contains a draft regulation on the analysis and quantitative assessment of the uncertainty of the estimated indicators of technogenic risk.

**Keywords:** risk-oriented approach; quantitative assessment of technogenic risk; uncertainty; quantification of uncertainty.

**For citation:** Kolesnikov E.Yu. On the need to account for uncertainty in quantification technogenic risk // Issues of Risk Analysis. 2022;19(5):80-89, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-5-80-89>

**The author declare no conflict of interest.**

## Содержание

Введение

1. Положение об анализе и количественной оценке неопределенности расчетных показателей техногенного риска
2. Анализ источников неопределенности
3. Количественная оценка неопределенности
4. Выполнение КОР в интервальной постановке

Заключение

Литература

## Введение

1. Используемый в настоящее время в нашей стране риск-ориентированный подход к управлению техногенной безопасностью (пожарной, промышленной, экологической безопасностью, безопасностью труда) предполагает выполнение процедуры количественной оценки риска (КОР), заключающейся в вычислении ряда численных индикаторов — показателей соответствующего вида риска, их сравнение с нормативными значениями, принятие по итогам сравнения решения о необходимости выполнения корректирующих мероприятий и, собственно, разработку таких мероприятий. Причем в качестве одного из основных критериев эффективности подобных мероприятий используется достигаемое

уменьшение показателей риска. Данные показатели, как принято в риск-методологии, одновременно количественно оценивают масштаб негативного события (взрыва/пожара, аварии, травмы, загрязнения природных сред) и его вероятность.

2. В Российской Федерации, согласно традиции, заложенной еще во времена Советского Союза, подобные расчеты принято выполнять с использованием не произвольных физико-математических моделей, а лишь моделей, допущенных к применению нормативно-методическими документами (НМД). Для предметной области настоящей статьи это НМД [1–6].

3. Согласно еще более давней традиции — подходу, обычно считающемуся безальтернативным, все подобные расчеты выполняются в точечной постановке. Это означает, что все входные и внутренние параметры используемых моделей задаются точечными (скалярными) числами, соответственно, результат вычислений (показатель риска) также представлен точечным числом. Между тем в области экспериментальных исследований в рамках естественных, инженерных наук давно уже стала научным стандартом количественная оценка неопределенности (КОН), поскольку, как известно, принципиально точно неизвестный результат любого измерения принято сообщать в виде некоторого интервала, внутри которого он содержится. В данном случае КОН заключается в оценке ширины интервала измерительной неопределенности.

Как известно, наряду с экспериментом, важнейшим инструментом научного исследования техногенных процессов является математическое моделирование. По ряду объективных и субъективных причин процедура количественной оценки техногенного риска также сопровождается неопределенностью: параметрической, модельной, термнологической и вычислительной. В силу данного обстоятельства использование точечных чисел для количественной оценки показателей риска является лишь очень грубым приближением.

4. Зарубежная практика применения риск-ориентированного подхода (далее — РОП) в области радиационной, промышленной безопасности имеет значительно более давнюю историю, нежели отечественная. По поводу его истоков и основоположников единого мнения среди специалистов до сих пор нет — одни склонны датировать начало РОП знаменитой статьей Чаунси Старра [7], вышедшей

в журнале “Science” в 1969 г., другие настаивают, что по-настоящему, во всей своей полноте РОП впервые был использован научной группой под руководством проф. Нормана Рассмуссена в проекте “WASH-1400” [8], посвященном сравнительной оценке безопасности коммерческих ядерных реакторов. Этот масштабный проект с учетом его сложности и объема был разработан удивительно быстро — всего за два года (1972–1974 гг.), общий его объем со всеми приложениями превысил тысячу страниц. “WASH-1400” был по-настоящему делом новаторским — одной из важнейших его новелл стала сама постановка проблемы наличия неопределенности при выполнении КОР, другой — первые попытки количественной оценки этой неопределенности.

Проблеме КОН, сопровождающей результаты КОР аварий, посвящено огромное количество публикаций, список литературы насчитывает тысячи наименований. К сожалению, почти все руководства по КОР, монографии, диссертации, отчеты, специализированные научные журналы, отдельные статьи, в которых рассматривается проблематика анализа и количественной оценки неопределенности РОП, написаны на английском языке. В этом «море» непросто выделить какие-то наиболее значимые источники. Из доступной мне литературы можно назвать в качестве таковых: а) руководства — МАГАТЭ [9, 10], «пурпурную» книгу TNO CPR-18E [11]; б) отчеты — Академии наук США [12], Комиссии по ядерному регулированию (США) [13]; в) монографии — Моргана и Хенриона [14], Бедфорда и Кука [15], Аиба и Клира [16]. В 2013 г. журналом «Проблемы анализа риска» был опубликован наш обзор в двух частях [17, 18], посвященный количественной оценке неопределенности.

5. Таким образом, более адекватное реальному положению дел оценивание пожарной, аварийной, экологической опасности, травмоопасности исследуемых объектов техносферы требует учета наличия источников неопределенности и выражение расчетных показателей риска в виде интервалов, внутри которых содержится их истинное (неизвестное) значение. Соответствующие математические инструменты для этого в настоящее время имеются. В основном это касается аналитических математических моделей, в которых искомые параметры задаются явно, в виде алгебраических уравнений. В подобных случаях интервальный подход

заключается в нахождении области значений интервально-значной функции.

В современном интервальном анализе это задача хорошо проработана.

Далее в статье приводится проект положения об анализе и количественной оценке неопределенности расчетных показателей техногенного риска, которым предлагается дополнить НМД, регламентирующие процедуру КОР. Положение носит рамочный характер, его идеология едина для всех областей техногенной безопасности — пожарной, промышленной, экологической, безопасности труда. Для каждой из этих областей остается несколько отредактировать его, уточнив специфику каждой предметной области, и включить в соответствующие НМД.

## 1. Проект положения об анализе и количественной оценке неопределенности расчетных показателей техногенного риска

### Введение

Риск-ориентированный подход к управлению техногенной безопасностью предполагает расчет (оценку) ряда численных индикаторов (показателей риска) по расчетным соотношениям (формулам), содержащимся в утвержденных нормативно-методических документах (НМД — методиках, Руководствах).

Расчеты по данным соотношениям (формулам) требуют использования ряда исходных данных, характеризующих:

- параметры технологического оборудования;
- физико-химические свойства опасных веществ;
- метеорологическую обстановку в момент взрыва, пожара или аварии;
- расположение и характеристики объектов-мишеней, оказавшихся в зоне поражающих факторов взрыва, пожара или аварии.

В настоящее время численные значения всех этих параметров принято подставлять в расчетные формулы в точечной форме, в виде вещественных чисел. После выполнения всех необходимых вычислений ответ получают также в виде точечного числа.

Между тем совершенно очевидно, что на самом деле значения практически всех вышенназванных параметров:

а) либо по объективным причинам варьируются в течение суток, сезонов года (таковы, например, все метеорологические и большая часть технологических параметров) — температура и влажность воздуха, скорость ветра, количество опасного вещества в емкостном оборудовании, давление в трубопроводе, концентрация компонентов в реакторе и т. п.;

б) либо их точное значение неизвестно (поскольку они получены экспериментальным методом или экспертным путем) и, кроме того, в опубликованных литературных источниках по их величине имеются расхождения. Таковы, например, большая часть физико-химических характеристик веществ, величина коэффициентов используемых формул. В качестве редкого исключения в пренебрежении широтным ходом (что вполне приемлемо для инженерных задач) можно назвать ускорение свободного падения, которому можно приписать точное (точечное) значение  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Следовательно, в реальности практически все входные параметры используемых для расчета показателей риска соотношений представлены некоторыми интервалами, в пределах которых либо меняется, либо находится актуальное (неизвестное точно) значение каждого подобного параметра. А привычные точечные значения являются лишь метками (маркерами) данных интервалов. Причем далеко не всегда в качестве подобных маркеров, что было бы логично, используются середины этих интервалов. Применение точечных значений не дает представления о том, в каком диапазоне на самом деле меняется величина показателей пожарного/аварийного рисков, являющихся результатами расчета.

Для чего необходимо оценивать величину интервалов, в которых будут меняться значения расчетных показателей риска во всем реальном диапазоне условий эксплуатации исследуемого объекта техносферы?

Это важно по нескольким причинам:

- во-первых, поскольку риск-ориентированный подход к управлению техногенной безопасностью предполагает принятие управлеченческих решений на основании сравнения расчетных показателей риска с нормативными значениями, критически важно не ошибиться с величиной этих показателей, учитывая весь возможный диапазон величины каждого из них;

- во-вторых, использование точечных значений входных параметров задачи и результатов расчета эквивалентно потере важнейшей информации о реальном положении дел;
- в-третьих, как на проектной стадии, так и на стадии эксплуатации опасного объекта техносферы при разработке мероприятий по повышению его техногенной безопасности необходимо иметь возможность оценки эффективности предлагаемых альтернативных решений, их ранжирования по критерию эффективности. Интервальная постановка задачи предлагает эффективный метод решения данной задачи (см. ниже).

Использование так называемого консервативного подхода, в рамках которого допускается, что все входные параметры задачи одновременно приобретают свои наиболее неблагоприятные значения (оценка т. н. наиболее вероятного и наиболее опасного сценариев), неразумно, т. к. вероятность каждого из этих событий очень мала, а совместной их реализации — исчезающе мала. С учетом данного обстоятельства принятие управлеченческих решений на базе консервативных оценок является ошибкой, ведущей к неоправданному перерасходу ресурсов.

Изменение величины параметра в пределах некоторого диапазона эквивалентно утверждению о наличии у данного параметра неопределенности. Таким образом, количественная оценка неопределенности (КОН) показателей техногенного риска означает оценку величины (ширины) интервала, который можно обоснованно приписать:

- а) величине каждого (или почти каждого) входного параметра задачи;
- б) результату расчетов — собственно показателям риска.

Прежде выполнения, собственно, процедуры КОН целесообразно выполнить предшествующий этап — этап анализа источников неопределенности.

## 2. Анализ источников неопределенности

Выполнение анализа источников неопределенности позволит эксперту/проектировщику получить представление о том, что является причиной изменчивости/неточности расчетных показателей техногенного риска, каково ее происхождение. Это является необходимым условием для последующей количественной оценки и управления неопределенностью.

В настоящее время является общепринятой следующая классификация типов неопределенности показателей техногенного риска:

- параметрический;
- модельный;
- терминологический (коммуникативный);
- вычислительный.

А. *Параметрическим* типом неопределенности обладают практически все параметры используемых для расчета показателей техногенного риска физико-математических моделей, как внешние, так и внутренние. Задание их значений скалярными числами в подавляющем большинстве случаев означает потерю существенной информации и исказжение реального положения дел. Это происходит из-за наличия следующих источников неопределенности:

а) либо объективного — изменчивости, вариабельности свойств взрывопожароопасного/опасного производственного объекта/природопользователя и окружающей его обстановки:

- изменчивости во времени величины технологических параметров;
- изменения величины метеорологических параметров в течение суток, сезонов года;
- перемены в расположении и свойствах объектов-мишеней;

б) либо — субъективного, обусловленного отсутствием точного знания о величине параметра. Это может иметь место, когда она получена экспериментальным путем с неизбежно присущей данному способу измерительной неопределенностью (по-старому — погрешностью), даже если в литературе величина параметра указана в виде точечного числа. В иных случаях она может быть получена менее строгими методами (анalogии, экспертиных оценок и т. д.). На наличие значительной параметрической неопределенности ясно указывает ситуация, когда различные литературные источники приводят различающиеся значения одного и того же параметра.

Следует отдавать себе отчет в том, что, поскольку величина внутренних параметров, используемых для оценки риска физико-математических моделей, в большей части случаев приводится в виде точечных чисел, это является лишь грубой оценкой и субъективным источником параметрической неопределенности.

Б. Главным источником модельного типа неопределенности служит альтернативность физико-математических моделей, применяемых для расчета показателей техногенного риска. С учетом данного обстоятельства разрешение использовать для этих целей лишь ограниченный перечень взаимосогласованных моделей, содержащихся в НМД, существенно сокращает данный источник неопределенности.

К числу прочих источников модельной неопределенности относят:

а) неуказание границ области применимости каждой модели, что не исключает ее использования за пределами обоснованной, валидированной области;

б) отсутствие в НМД четких указаний на исчерпывающий перечень сценариев взрыва, пожара, аварии режимов работы оборудования, являющегося источником выбросов и сбросов загрязняющих веществ, травмы, которые могут являться следствием каждой рассматриваемой опасной ситуации. Это нередко приводит к оценке недостаточно квалифицированными экспертами/проектировщиками избыточного или недостаточного перечня подобных сценариев, и в итоге — к существенным искажениям показателей риска;

в) использование в физико-математических моделях ряда допущений и упрощений.

В. Терминологический тип неопределенности параметров техногенного риска обязан своим возникновением либо полным отсутствием, либо нечетким определением (толкованием) используемых понятий.

В качестве примеров можно назвать понятия:

а) средней концентрации опасного вещества в воздухе — без указания на период осреднения;

б) средней скорости ветра — без задания периода осреднения и высоты над подстилающей поверхностью;

в) длины пламени (пожара пролива, факела) — без ясного указания, учитывается ли светимость пламени только в видимом или еще и в инфракрасном диапазонах.

Терминологический тип неопределенности ведет, вообще говоря, к различающейся трактовке одно и того же понятия разными экспертами/проектировщиками при выполнении расчетов, присвоению им вследствие этого различных значений, и как

результат — различиям в величине показателей техногенного риска.

С учетом сказанного наличие в каждом НМД полного глоссария способно ликвидировать данный источник неопределенности.

Г. Вычислительный тип неопределенности является атрибутом (неотъемлемой чертой) математического моделирования с использованием современных вычислительных методов и электронно-вычислительных машин. Аналитическое решение вручную модельных уравнений осталось в прошлом, современное математическое моделирование предполагает выполнение численных расчетов на ЭВМ с использованием специализированных пакетов прикладных программ.

При этом применяются:

- числа с плавающей запятой, требующие округления;
- итерационные процедуры с отсечкой;
- вычисление математических рядов с учетом конечного числа членов ряда и т. д.

Каждая подобная операция добавляет к результату вычислений некоторую погрешность, в итоге эти погрешности суммируются и отличают полученный результат расчета от истинного (неизвестного) значения.

Совершенно особый тип вычислительной неопределенности сопровождает интервальные вычисления, т. е. математические операции над интервальными числами. При непринятии специальных мер противодействия неопределенность интервальных расчетов может стать настолько большой, что сделает подобные расчеты либо невозможными, либо нецелесообразными с практической точки зрения.

### 3. Количественная оценка неопределенности

Как уже было отмечено, количественный аспект неопределенности заключается в том, что из-за наличия вышеописанных источников неопределенности величина большей части внутренних и внешних параметров физико-математических моделей, а также расчетных показателей техногенного риска представлена некоторыми диапазонами, в пределах которых актуальное точное (принципиально неизвестное) значение параметра либо находится, либо варьирует.

Задача КОН заключается в оценке границ этих диапазонов (интервалов).

Исторически впервые в рамках методологии количественной оценки аварийного риска (КОР) задача КОН была поставлена группой проф. Нормана Расмуссена в 1972 г., в самом начале работы над отчетом “WASH-1400” о безопасности коммерческих ядерных реакторов.

Впоследствии по мере развития риск-ориентированного подхода к управлению радиационной, промышленной безопасностью разрабатывались, совершенствовались и методы выполнения КОН.

На сегодняшний день представлены три основные группы таких методов, иначе — постановки:

- вероятностная;
- нечеткая;
- детерминистическая.

1. *Вероятностная* постановка КОН (вероятностный подход) в историческом плане была самой первой, она использовалась еще в рамках работ над проектом “WASH-1400”. Вероятностный подход постулирует, что каждая реализация величины параметра модели является случайной величиной, подчиняющейся одному из известных законов распределения вероятности. В таком случае результат расчета — величина показателя техногенного риска — также есть случайная величина. Множество реализаций всех этих величин образует выборку, в пределе — генеральную совокупность. Статистика каждой такой величины (в т. ч. показателя риска) обладает моментами распределения вероятности, основными из которых являются математическое ожидание и дисперсия. Математический аппарат теории вероятности позволяет, зная законы распределения вероятности параметров модели, вычислить моменты показателей техногенного риска, другие статистические параметры — доверительные интервалы, доверительные вероятности и т. д.

Однако для сложных физико-математических моделей подобные расчеты оказываются очень трудоемкими, поэтому на практике вероятностный подход к выполнению КОН реализуется с помощью гениального изобретения Станислава Улама и Джона фон Неймана — метода статистического моделирования. Его практическая реализация стала возможной во второй половине 40-х гг. XX в., после появления первых электронно-вычислительных машин, на базе которых были созданы генера-

торы (псевдо) случайных чисел. В настоящее время метод широко известен под названием метода Монте Карло.

Суть его заключается в том, что для случайной величины каждого параметра модели постулируется вид закона распределения вероятности. Затем в каждом вычислительном эксперименте (прогоне) генератор случайных чисел присваивает этим параметрам случайные значения согласно заданным законам распределения. Далее с полученными точечными значениями входных параметров модели ЭВМ выполняет расчет и получает результат (в рассматриваемом случае — показатель риска).

Многократное повторение (десятки, сотни тысяч и более раз) подобных расчетов дает статистику случайной величины показателя риска, для которой можно оценить все необходимые моменты, в том числе доверительные интервалы (для заданных уровней доверительной вероятности). Эти интервалы и являются целью КОН в вероятностной постановке. Метод статистического моделирования (Монте Карло) хорошо отлажен, разработано необходимое программное обеспечение.

Исторически метод Монте Карло широко применяется для целей КОН в области радиационной безопасности, он рекомендован МАГАТЭ. Между тем не следует забывать, что объекты ядерного цикла образуют особую группу технически сложных объектов, относительно унифицированных по компонентам, для которых имеются подробные базы данных о параметрах надежности.

Этот метод для целей КОН показателей риска в настоящее время широко используют не только для объектов ядерной энергетики. Но популярность, простота и наглядность метода не должны заставить его недостатки, имеющие принципиальный характер. Между тем они заложены уже в самом его основании. Как известно, обоснованное применение методов теории вероятности требует соблюдения необходимого условия статистической устойчивости (примерного постоянства статистик выборок). К сожалению, для опасных объектов реальной техносферы это условие не соблюдается из-за их больших индивидуальных различий внутри группы подобных объектов — различий, обусловленных конструктивными особенностями, историей эксплуатационных нагрузок и технического обслуживания. С учетом данного обстоятельства следует

заключить, что решение задачи КОН в вероятностной постановке в рамках риск-ориентированного подхода при управлении техногенной безопасностью в общем случае является необоснованным.

2. Некоторое распространение (в настоящее время скорее теоретическое) к выполнению КОН получил подход, основанный на использовании *нечетких чисел*. Как известно, понятие нечеткого множества (числа) было введено Лотфи Заде в 1965 г. Подобно функции плотности вероятности случайного числа нечеткому числу (*fuzzy set*) в пределах интервала его значений присваивается достаточно гладкая *функция принадлежности*. Ее коренное отличие от функции плотности вероятности заключается в том, что если интервал от функции плотности вероятности всегда по определению равен 1, то интеграл от функции принадлежности может быть равен любому неотрицательному числу. К настоящему времени разработан математический аппарат теории нечетких чисел, который может быть использован для решения задач КОН показателей риска. Опубликованы работы, в которых показано, что все операции над нечеткими числами могут выполняться в рамках интервального анализа. Однако, поскольку задание вида функции принадлежности нечеткого числа, подобно функции плотности вероятности случайного числа, сопряжено с некоторым произволом, данный подход сам привносит в результат КОН немалую неопределенность.

3. *Детерминистическая* постановка задачи КОН в аварийной, пожарной безопасности тоже имеет немалую историю. Несколько десятилетий назад западными специалистами она обычно сводилась к введению т. н. коэффициентов (факторов) неопределенности UF (равных 10, 100 или более). В рамках данного подхода искомые интервалы неопределенности получали, умножая результат расчета (показатель риска) на UF.

На сегодняшний день очень перспективной разновидностью детерминистического подхода является интервальная постановка задачи. Ее главное преимущество — независимость от весьма произвольного допущения о соблюдении того или иного закона распределения вероятности (вида функции принадлежности). Интервальному подходу подобное предположение не требуется. Это означает, что он ничего не утверждает о поведении величины па-

раметра внутри интервала неопределенности, его задачей является лишь определение границ этого интервала. Естественной мерой неопределенности интервального числа является его ширина.

Интервальная постановка задачи КОН заключается в том, что:

1) значения всех входных параметров задаются не точечными величинами, а интервальными числами = замкнутыми интервалами (отрезками числовой оси);

2) все необходимые расчеты в рамках используемой физико-математической модели выполняются по правилам интервального анализа.

Интервальный анализ является быстроразвивающейся ветвью математики, математической дисциплиной, предметом которой является решение задач с интервальными числами, представляющими ограниченные неопределенности в данных. Слово «ограниченные» здесь важно, поскольку рассмотрение интервалов с бесконечными границами является особым случаем, находящимся вне предмета КОН показателей техногенного риска.

Некоторая произвольность интервального подхода связана с тем, что с учетом свойства выпуклости интервального числа (отсутствие внутри него лакун (дыр)) принимается допущение о том, что величина может принимать любое значение между границами интервала.

Неопределенность положения границ интервального числа называется *вторичной неопределенностью*, которая характерна для любого подхода к КОН.

#### 4. Выполнение КОР в интервальной постановке

Главная идея интервального анализа (ИА) заключается в замене арифметических операций над вещественными числами и вычислении алгебраических функций вещественного аргумента интервальными операциями и функциями с интервалами. Основные правила интервальной арифметики были разработаны еще в первой половине прошлого века. Они составляют содержание классического (т. н. наивной версии) интервального анализа.

Некоторое время назад отмечались попытки использовать наивную версию ИА для решения инженерных задач с вещественными интервальными числами. Однако все они оказались безуспешными,

поскольку после выполнения каждой алгебраической операции ширина результата расчетов в большинстве случаев неоправданно возрастала. В итоге либо дальнейшие вычисления были невозможны (например, под знаком радикала оказывалось интервальное число с отрицательной областью значений, либо аргументом обратной тригонометрической функции — интервальное число, нижняя или верхняя граница которого по модулю больше 1), либо полученный результат из-за своей чрезмерной неопределенности не представлял практической ценности.

Описанный негативный эффект не проявляется только в одном случае — если каждый интервальный параметр входит в расчетное соотношение не более одного раза и только в первой степени. Этот эффект наряду с другими, менее значимыми особенностями интервальных расчетов оказался причиной утраты интереса к ИА в инженерных кругах, в том числе при выполнении КОР.

Между тем в современном ИА разработан ряд методов, позволяющих свести на нет негативные особенности его наивной версии:

- метод Рамона Мура;
- аффинное представление интервального числа;
- метод глобальной оптимизации.

Выполнение КОР в интервальной постановке в настоящее время возможно и с практической точки зрения, поскольку на рынке представлены программные продукты, позволяющие выполнять вычисления с интервальными входными параметрами моделей с учетом перечисленных методов.

Наличие в интервальном анализе понятия *вырожденного интервала* — интервального числа, у которого нижняя и верхняя границы совпадают, позволяет задавать точечные числа вырожденными интервалами. Если заменить все интервальные входные параметры используемых физико-математических моделей вырожденными интервалами, совпадающими с серединами соответствующих интервалов, выполнение КОР в интервальной постановке не будет отличаться от КОР в традиционной точечной постановке.

Упомянутую выше оценку параметрической чувствительности моделей в интервальной постановке

осуществить очень просто — для этого сначала необходимо ширину всех интервальных входных параметров модели многократно уменьшить (например, в 100 раз). Далее следует последовательно выполнять требуемые расчеты, при каждом «прогоне» придавая только одному «испытуемому» входному параметру его истинную ширину. Ширина интервального показателя риска в каждом «прогоне» будет являться «откликом» модели и характеристикой ее чувствительности к данному параметру. По завершении процедуры ранжирование модели по ее параметрической чувствительности не составит труда.

В завершение следует указать, что в случае, если имеется информация (эксплуатационная, метеорологическая, статистическая) о поведении величины некоторых входных параметров модели в пределах их интервалов, она может быть использована для существенного сужения интервалов показателей техногенного риска.

## Заключение

Внедрение интервального подхода к выполнению КОР, безусловно, является шагом необходимым, но достаточно революционным, поэтому наиболее разумным было бы постепенное его введение, параллельно с классическим, точечным подходом.

## Литература [References]

1. СП 505.1311500.2021. Расчет пожарного риска. Требования к оформлению. [SP 505.1311500.2021. Fire Risk Calculation. Requirements for registration, (In Russ.)]
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденная приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382. [Procedure for Determination of Design Values of Fire Risk in Buildings, Structures and Fire Compartments of Different Classes of Functional Fire Hazard, Approved by Order of EMERCOM of Russia No. 382 dated June 30, 2009, (In Russ.)]
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденная приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404. [Procedure for Determination of Design Values of Fire Risk at Production Facilities Approved by Order No. 404 of EMERCOM of Russia dated July 10, 2009, (In Russ.)]

4. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утвержденное Приказом РТН от 11 апреля 2016 г. № 144. [Safety Manual “Methodological Basis for Hazard Analysis and Risk Assessment of Accidents at Hazardous Production Facilities”, approved by RTN Order No. 144 dated April 11, 2016, (In Russ.)]
5. ГОСТ Р 12.0.010-2009 ССБТ. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков. [GOST R 12.0.010-2009 SSBT. Occupational Health and Safety Management Systems. Hazard Identification and Risk Assessment, (In Russ.)]
6. Р 2.2.1766-03. Руководство по оценке профессионального риска (ОПР) для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. [Р 2.2.1766-03. Occupational Risk Assessment (ER) Guidelines for Worker Health. Organizational and Methodological Basis, Principles and Evaluation Criteria, (In Russ.)]
7. Starr, Chauncey Social benefit versus technological risk // Science. 1969. Vol. 165. Issue 3899. P. 1232–1238. DOI:10.1126/SCIENCE.165.3899.1232
8. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1975). Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Main report. 226 p.
9. IAEA safety series No. 100. Evaluating the reliability of prediction made using environmental transfer models, 1989. 105 p.
10. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-3 Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. Vienna. 2010. 215 p.
11. CPR-18E Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book). 2nd ed. Hague: VROM, 2005. 237 p.
12. NAS USA. Report: Assessing the Reliability of Complex Models: Mathematical and Statistical Foundations of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification. Washington D.C: The National Academies Press, 2012. 185 p.
13. US.NPC. NUREG-1855 Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making Washington D.C. 2007. 113 p.
14. Morgan, Henrion Uncertainty A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press, 1990. 344 p.
15. Bedford T. and Cooke R. Probabilistic Risk Analysis, Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 394 p.
16. Ayyub, Klir Uncertainty Modeling and Analysis in Engineering and the Sciences. Chapman & Hall/CRC, 2006. 380 p.
17. Колесников Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 1 // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. №2. С. 48–71. [Kolesnikov E.Yu. The quantitative assessment of technogenic risk uncertainty. Part 1 // Issues of Risk Analysis. 2013;10(2):48-71, (In Russ.)]
18. Колесников Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 2 // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. №3. С. 8–31. [Kolesnikov E.Yu. The quantitative assessment of technogenic risk uncertainty. Part 2 // Issues of Risk Analysis. 2013;10(3):8-31, (In Russ.)]

## Сведения об авторе

**Колесников Евгений Юрьевич:** доктор технических наук, профессор Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Количество публикаций: 89

Область научных интересов: анализ и количественная оценка неопределенности параметров техногенного риска  
Scopus Author ID: 57212259662

ORCID: 0000-0003-0833-6863

### Контактная информация:

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
e.konik@list.ru

Статья поступила в редакцию: 04.07.2022

Одобрена после рецензирования: 15.08.2022

Принята к публикации: 05.09.2022

Дата публикации: 31.10.2022

*The article was submitted: 04.07.2022*

*Approved after reviewing: 15.08.2022*

*Accepted for publication: 05.09.2022*

*Date of publication: 31.10.2022*