

УДК 62.001.25

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2016

О способах расчета метрик аварийного риска при наличии неопределенности

Е. Ю. Колесников,Поволжский государственный
технологический университет,
г. Йошкар-Ола**В. М. Колодкин,**Удмурдский государственный
университет,
г. Ижевск

Аннотация

При выполнении анализа и количественной оценки аварийного риска необходимо учитывать наличие неопределенности у множества параметров задачи. Без привлечения гипотез о поведении величины параметра внутри диапазона его возможных изменений это может быть сделано путем задания этих параметров интервалами и выполнением всех необходимых расчетов интервальными методами. В статье выполнены расчеты аварийного риска условного опасного объекта шестью способами — двумя точечными и четырьмя интервальными. Точечные расчеты выполнены в консервативной и усредненной постановке. Интервальные расчеты выполнены как естественным (наивным), так и тремя другими методами, с принятием мер по сужению интервалов, являющихся результатами вычислений. Учитывая, что аварийный риск оценивает как величину ущерба от аварии, так и вероятность его причинения, предложен способ уменьшения ширины интервала этой метрики. Данный способ может быть использован только при наличии надежной информации о поведении величины параметров внутри интервалов их изменений.

Результаты работы показывают, что использованные в ней методы позволяют значительно улучшить качество получаемых интервальных оценок.

Ключевые слова: аварийный риск, виды неопределенности, способы уменьшения неопределенности риска, интервальный анализ, методы сужения интервалов.

Содержание

Введение

1. Способы уменьшения неопределенности метрик риска

2. Пример оптимизации расчета интервальных метрик аварийного риска

Заключение

Литература

Введение

Процедура количественной оценки риска (КОР) опасных объектов является, по сути, одной из процедур оценки соответствия, поскольку предполагает сравнение полученных в результате расчета (либо экспертизы) метрик риска с их нормативными значениями. Уже на первом этапе применения методологии анализа риска было понятно, что многие параметры задачи (например, свойства опасного объекта, окружающей его обстановки) в реальных условиях варьируют, меняются в пределах некоторых диапазонов. Чтобы учесть эти вариации, вначале предлагалось выполнять количественные оценки по самому консервативному сценарию, при котором количество опасного вещества,

участвующего в аварии, — наибольшее, а метеоусловия и расположение объектов-мишеней в зоне поражения — самые неблагоприятные. Однако со временем от данного подхода отказались, поскольку вероятность сочетания всех этих условий одновременно слишком мала. В качестве альтернативы было предложено при оценке риска ориентироваться на средние величины параметров. С нашей точки зрения, и этот подход является неудовлетворительным, поскольку: а) создает опасную иллюзию точной оценки; б) не позволяет оценить диапазон, в котором на самом деле меняется метрика риска из-за фактических вариаций параметров задачи. Подобные изменения параметров принято называть и количественно оценивать их неопределенностью.

Наличие у параметров риска неопределенности хорошо известно. Причины этого факта, отчасти объективные, отчасти субъективные, проанализированы нами в [1]. Показано, что неопределенность метрики аварийного риска по происхождению может быть *терминологической, параметрической и модельной*. К этому ряду следует добавить *вычислительную* неопределенность, обусловленную особенностями применяемых при расчете вычислительных методов.

Как же поступать, чтобы при выполнении КОР учитывать неопределенность параметров задачи? Вообще говоря, предложено несколько способов — с использованием нечетких чисел, в вероятностной постановке, методами интервального анализа. Последний метод нам представляется наиболее универсальным, поскольку не требует привлечения каких-либо гипотез о поведении величины параметра внутри диапазона [2].

Количественная оценка неопределенности (КОН) необходима в том числе для того, чтобы при оценке соответствия опасного объекта вычленять вклад свойств самого объекта в общий бюджет неопределенности целевой метрики риска.

Между тем имеющийся опыт показывает, что выполнение расчетов целевых метрик риска в полной интервальной постановке, без принятия специальных мер по уменьшению вычислительной неопределенности, в качестве результата нередко дает интервальные величины очень значительной ширины. Их сравнение (evaluation) с норматив-

ными значениями аварийного (пожарного) риска, представленными в настоящее время скалярными (точечными) величинами, приведет к ситуации, в которой норматив (скаляр) окажется внутри интервала значений целевой метрики. А в подобной ситуации определенные выводы об обеспечении аварийной (пожарной) безопасности на опасном объекте не могут быть сделаны. Это, безусловно, затрудняет управление аварийной (пожарной) безопасностью в рамках риск-ориентированного подхода. Следовательно, принципиально важно предложить меры, способные уменьшить субъективный (в частности, вычислительный) компонент неопределенности целевых метрик риска.

В данной работе рассматриваются негативные особенности интервальных методов и способы их преодоления.

1. Способы уменьшения неопределенности метрик риска

Учитывая наличие идентифицированных выше источников неопределенности результатов КОР, можно предложить следующие направления работы по уменьшению неопределенности целевых метрик риска.

1. Ликвидация терминологической неопределенности. Ликвидировать этот источник неопределенности наиболее просто, проблему решит разработка соответствующего глоссария, в котором все параметры, используемые при выполнении КОР, получили бы четкое и недвусмысленное толкование. Данному глоссарию следует придать нормативный статус и сделать обязательным его применение.

2. Минимизация модельной неопределенности. Для более точного прогнозирования поражающих факторов аварий необходимо продолжить теоретические исследования с целью разработки более адекватных физико-математических моделей аварийных процессов с обязательной их последующей экспериментальной верификацией. Для любой подобной модели должна быть ясно очерчена область ее применимости. Модельную неопределенность в части оценки поражающих факторов эффективно минимизирует испытанный отечественный способ, суть которого заключается в том, что некая физико-математическая модель назначается эталонной и утверждается в установленном порядке в качестве

нормативной. По мере разработки более совершенных моделей нормативная модель подлежит замене.

Наш анализ показал [2], что минимизация модельной неопределенности при прогнозировании последствий (ущерба) аварии требует выполнения большого объема работы по совершенствованию способов оценки аварийного ущерба — как в натуральном, так и (особенно) в денежном выражении.

Согласно выполненным количественным оценкам источником очень большой неопределенности является этап КОР, на котором оцениваются вероятности — аварийного события, реализации тех или иных сценариев аварии, причинения ущерба заданной степени объектам-мишеням. Еще предстоит оценить вклад объективной и субъективной составляющих в общий бюджет неопределенности данного этапа.

3. Минимизация параметрической неопределенности. В тех случаях, когда имеется надежная статистически устойчивая информация о поведении величины параметра внутри границ интервала, ее использование позволяет получить определенный результат по уменьшению неопределенности метрики риска. Данный способ основан на учете особенностей целевой метрики аварийного риска, которая учитывает как величину ущерба, так и вероятность его причинения. Наиболее полная информация подобного рода может быть представлена, когда известна функция плотности вероятности параметра в заданном интервале. Менее информативно кусочно-непрерывное представление о вероятности нахождения величины параметра внутри подинтервалов, на которые поделен интервал ее изменений.

Подобный прием может быть использован для любых параметров задачи, у которых имеется устойчивая статистика (например, метеорологических параметров для данной местности). При этом следует проявлять осторожность в тех случаях, когда статистика имеется для большой группы примерно схожих объектов. Их индивидуальные различия могут оказаться столь значительными, что объединить их в генеральную совокупность не представляется возможным. В подобных ситуациях различия между их выборками также будут очень большими, поэтому ни о каких устойчивых закономерностях говорить не приходится.

4. Минимизация вычислительной неопределенности. За последние десятилетия интервальный анализ как ветвь математики усилиями отечественных и зарубежных специалистов получил значительное развитие, см., например [8—10]. Показано, что некоторые трудные математические задачи решаются его методами успешнее, чем в рамках классической математики. Одновременно выявлены и исследованы проблемы, присущие исключительно интервальным методам. Например, имеет место непропорциональное увеличение ширины результата расчетов в случаях, когда параметры расчетного выражения входят в него более одного раза либо связаны между собой функционально. Для минимизации этих эффектов предложено несколько методов [8—10], в том числе методы глобальной оптимизации.

Применительно к рассматриваемой нами задаче минимизация вычислительной неопределенности интервальных вычислений заключается в поиске минимальной области значений функций, используемых в физико-математических моделях аварийных процессов.

2. Пример оптимизации расчета интервальных метрик аварийного риска

С учетом ограниченных рамок статьи в качестве опасного объекта рассмотрим склад легковоспламеняющихся жидкостей, на территории которого расположен резервуар РВС-300 (высота 7,5 м, диаметр 7,58 м) с диизопропиловым эфиром. Резервуар расположен внутри защитного обвалования, имеющего вид вертикальной стальной стенки высотой $h_{ог} = 2,7$ м, находящейся на расстоянии 3,5 м от стенки резервуара. Окружающее склад пространство сильно загромождено. Персонал находится на открытой местности на удалении 8÷13 м от центра резервуара.

Те же ограничения не позволяют проанализировать здесь весь спектр возможных вариантов разгерметизации резервуара и последующих событий. Посему рассмотрим наиболее драматичный сценарий аварии — полное квазимгновенное раскрытие резервуарной стенки, сопровождающееся частичным переливом ЛВЖ через обвалование.

Из всего перечня возможных сценариев дальнейшего развития аварийной ситуации, опять-та-

ки в силу ограничений места, выберем для анализа сценарий объемного взрыва паровоздушного облака (ПВО), образовавшегося вследствие длительного испарения пролива диизопропилового эфира.

Положим, что вероятность аварии (квази-мгновенной разгерметизации РВС-300) составляет 10^{-4} год $^{-1}$, условная вероятность реализации рассматриваемого сценария (объемного взрыва паровоздушного облака) — 0,2.

Все вычисления выполним с помощью программного кода INTLAB версии 7.1, являющегося интервальным приложением (toolbox) к MATLAB. INTLAB разработан профессором З.М. Румпом из Гамбургского института надежных вычислений.

Терминологическая неопределенность. Выполненный нами анализ позволил идентифицировать для рассматриваемого сценария аварии следующие источники данного типа неопределенности:

- скорость воздушного потока (таблица П3.5 [4]) — в нормативной методике отсутствуют указания, на какой высоте и с каким периодом осреднения следует измерять скорость ветра. Между тем это важно, поскольку в России, как и в Европе, среднюю скорость ветра принято измерять на высоте флюгера (10 м) с усреднением за 20 минут, а в США и Индии — иначе;

- понятие (средней) концентрации паров горючего вещества в паровоздушной смеси $C_{\text{п}}$. Как известно, открытая атмосфера всегда (кроме непродолжительных периодов выраженной температурной инверсии) сильно турбулизована, поэтому этот параметр очень существенно зависит от периода осреднения. Неуказание периода осреднения концентрации создает значительную терминологическую неопределенность.

Модельная неопределенность может быть минимизирована использованием для расчета пожарного риска исключительно моделей нормативной методики [4], утвержденной Приказом МЧС России. Однако, к сожалению, полностью это модельную неопределенность не исключает, поскольку:

- 1) остается произвол в идентификации класса окружающего пространства экспертом;

- 2) таблица П3.3 [4] позволяет идентифицировать лишь наиболее вероятный тип взрывного превращения ПВО в рассматриваемых условиях, веро-

ятность реализации других типов остается не равной нулю;

- 3) рекомендованный [4] метод расчета интенсивности испарения пролива W , кг/с $\cdot$ м 2 , основан на положениях молекулярной диффузии и мало-пригоден для условий открытой атмосферы с развитым турбулентным обменом [11]. Отсутствие учета величины скорости ветра при расчете w является серьезным дефектом данного метода. Следует отметить, что он неоднократно подвергался заслуженной критике;

- 4) еще одним изъяном следует считать игнорирование нормативной методикой [4] сценария развития аварии, при котором образующееся в результате испарения пролива паровоздушное облако дрейфует по ветру и может взорваться на некотором удалении от места образования.

Параметрическая неопределенность. Придерживаясь предложенной нами в [1] классификации, выделим три группы параметров, имеющих различную природу неопределенности:

- а) природно-эксплуатационная группа в рассматриваемом случае представлена следующими параметрами задачи:

- масса ЛВЖ в резервуаре в момент аварии m_0 , кг. Принимаем интервал $m_0 \in [30\ 000; 200\ 000]$ кг. При этом согласно эксплуатационной документации 50% времени величина $m_0 \in [100\ 000; 170\ 000]$ кг, 20% — $m_0 \in [30\ 000; 100\ 000]$ кг, 30% — $m_0 \in [170\ 000; 200\ 000]$ кг;

- температура атмосферного воздуха $T_{\text{в}}$, К. По данным [12] среднемесячные температуры атмосферы для рассматриваемой местности, °С: 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. Таким образом, $T_{\text{в}} \in [261,05; 291,75]$ К. Выполнив внешнее округление границ интервала, получим $T_{\text{в}} \in [261; 292]$ К. Поскольку нижняя граница интервала $T_{\text{в}}$ находится в пределах температурного диапазона взрываемости паров ЛВЖ [13], реализация рассматриваемого сценария возможна.

Далее средствами MATLAB аппроксимируем годовой ход температуры [15] полиномом шестой степени, результаты представлены на рис. 1. Затем разобьем весь диапазон температур $T_{\text{в}}$ на 31 подынтервал шириной 1 К и подсчитаем часто-

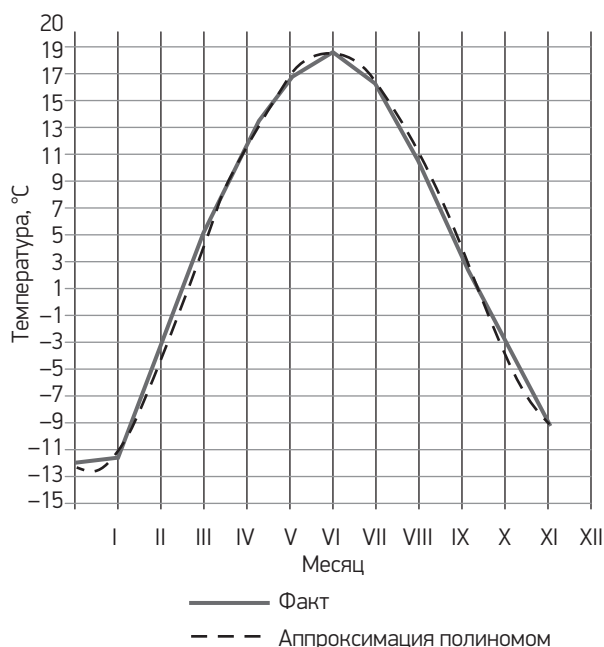


Рис. 1. Годовой ход среднемесячной температуры приземной атмосферы

ты n_j попадания температуры в эти подынтервалы ($j = 1, 2, \dots, 31$). В качестве оценки вероятностей P_{Tj} распределения температуры воздуха в диапазоне [261; 292] К нами были приняты величины $P_{Tj} = n_j/31$ (очевидно, что условие нормировки $\sum_{j=1}^{31} P_{Tj} = 1$ выполнено);

- согласно эксплуатационным данным вероятности нахождения персонала на удалении от центра резервуара в интервале 8—15 м могут быть дифференцированы следующим образом: 20% времени люди пребывают на расстоянии $X_1 \in [8; 10]$ м ($P_{X1} = 0,2$), 70% времени — на расстоянии $X_2 \in [10; 13]$ м, остальные 10% — $X_3 \in [13; 15]$ м ($P_{X3} = 0,1$);

б) модельная группа:

- параметр Z , задающий долю опасного вещества в ПВО, принимающего участие во взрыве. В общем случае нормативная методика [4] рекомендует для Z точечное значение 0,1; хотя в литературе имеются совершенно иные оценки величины данного параметра. Например, Ван ден Берг с коллегами (Van den Berg A.C. et al.), проанализировав

последствия 23 реальных аварий, оценили эффективность взрыва величиной из диапазона от 0,0002 до 0,159 со средним значением 0,03 [7];

- скорость звука в воздухе, м/с. Нормативная методика оперирует исключительно точечным значением $u_{зв} = 340$ м/с. Между тем, как известно, скорость звука в газах возрастает пропорционально корню квадратному из температуры:

$$u_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}}, \quad (1)$$

где R — универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/кмоль · К;

γ — показатель адиабаты (коэффициент Пуассона) газа;

μ — молярная масса газа, кг/кмоль.

Таким образом, с учетом величины коэффициента Пуассона для воздуха $\gamma = 1,4$ и молярной массы воздуха $\mu = 29$ кг/кмоль, для принятого нами диапазона температуры T_b скорость звука в воздухе $u_{зв} \in [325,5; 342,2]$ м/с. Однако в данной работе при выполнении расчетов согласно [4] будет использована точечная (неинтервальная) величина $u_{зв} = 340$ м/с;

- стехиометрическая концентрация паров ЛВЖ $C_{ст}$, об. %. Химическая формула диизопропилового эфира $C_6H_{14}O$. Следовательно, по формуле (32) Руководства [17]

$$C_{ст} = \frac{100}{4,84 \cdot \beta + 1}, \quad (2)$$

где $\beta = m_c + \frac{m_n}{4} - \frac{m_o}{2} = 6 + \frac{14}{4} - \frac{1}{2} = 9,0$ об. %,

получаем $C_{ст} = \frac{100}{4,84 \cdot 9 + 1} = 2,24$ об. %;

- величина нижнего концентрационного предела $C_{НКПР}$, об. %. Справочник [13] дает точечное значения $C_{НКПР} = 1,3$ об. %;

- константы уравнения Антуана, согласно справочнику [13]: $A = 6,22$; $B = 1256,7$; $C_A = 230,4$;

- коэффициент разлития f_p , м⁻¹. Нормативная методика [4] для неспланированной территории (именно такой тип подстилающей поверхности

на рассматриваемом условном складе ЛВЖ) рекомендует точечное значение $f_p = 20 \text{ м}^{-1}$;

в) в смешанную группу отнесем параметры, характеризующие физико-химические свойства диизопропилового эфира:

- молярная масса μ , кг/кмоль. Справочник [13] сообщает точечное значение $\mu = 102,2 \text{ кг/кмоль}$;
- плотность данного ЛВЖ $\rho_{ж0} = 723 \text{ кг/м}^3$ при 288 К [13]. Пренебрегая зависимостью коэффициента теплового расширения κ от температуры, принимаем $\kappa = 0,001496 \text{ К}^{-1}$ [16], тогда в рассматриваемом нами диапазоне температур T_v плотность жидкой фазы диизопропилового эфира

$$\rho_{ж}(T) = \rho_{ж0} \cdot [1 - \kappa \cdot (T - T_{ст})] \quad (3)$$

находится в интервале $\rho_{ж}(T) \in [718,7; 752,2] \text{ кг/м}^3$;

- удельная теплотворная способность $E_{уд}$, Дж/кг. С учетом рекомендаций [4] принимаем для диизопропилового эфира $E_{уд} = 0,82 \cdot 44\,000\,000 = 3,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$;

- скорость фронта распространения пламени. Идентифицировав с помощью экспертной таблицы ПЗ.3 нормативной методики наиболее вероятный класс взрывного превращения на рассматриваемом опасном объекте как второй, находим для скорости фронта пламени интервал $u_{фр} \in [300; 500] \text{ м/с}$.

2.1. Точечный расчет индивидуального аварийного риска

Сначала выполним расчет целевой метрики — индивидуального аварийного (пожарного) риска персонала рассматриваемого склада ЛВЖ — в точечной постановке:

- а) консервативной;
- б) средней.

Расчет в консервативной постановке. Объем V_0 ЛВЖ в резервуаре на момент аварии с учетом начальной массы m_0 и плотности $\rho_{ж}$ приравняем к максимальному значению $V_0 = 265,9 \text{ м}^3$, а начальный уровень h_0 при площади основания РВС-300, равной $45,1 \text{ м}^2$, составляет $h_0 = 5,89 \text{ м}$.

Относительный объем перелива ЛВЖ за пределы обвалования $V_{пер}$ при полной квазигмгновенной разгерметизации резервуара $\phi = V_{пер}/V_0$ согласно рисунку ПЗ.3 нормативной методики [4] зависит от единственного параметра — отношения высоты

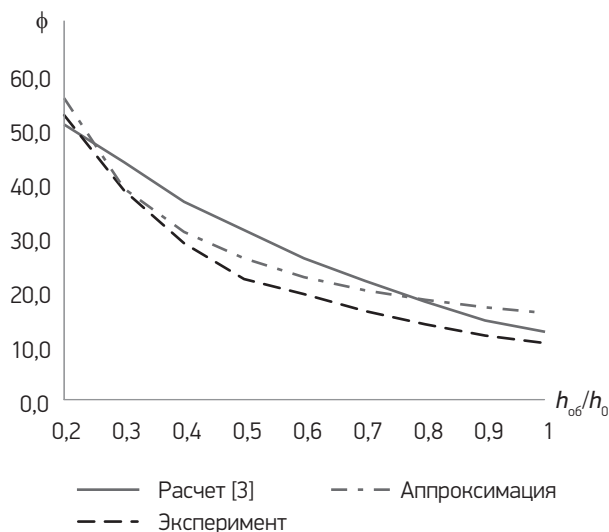


Рис. 2. Зависимость доли переливающей через обвалование жидкости ϕ от параметра $h_{об}/h_0$

обвалования к начальному уровню ЛВЖ в резервуаре $\xi_{об} = h_{об}/h_0$. Очевидное влияние на величину ϕ расстояния от стенки резервуара до (гребня) обвалования отсутствует, по-видимому, из-за их стандартного взаиморасположения. Представленная на графике рисунка ПЗ.3 [4] зависимость $\phi(\xi_{об})$ может быть грубо аппроксимирована гиперболой (рис. 2):

$$\phi = \frac{0,1}{\xi_{об}} \quad (4)$$

С учетом перелива части ЛВЖ через обвалование общая площадь пролива

$$S_{пр} = \pi \cdot R_{об}^2 + \phi \cdot V_0 \cdot f_p \quad (5)$$

Расчет в MATLAB дал значение площади пролива $S_{пр} = 1438 \text{ м}^2$.

Для определения массы паров эфира в ПВО необходимо определить величину интенсивности (удельной массовой скорости) его испарения W , кг/с $\cdot$ м², с поверхности пролива. Нормативная методика [4] использует для этих целей зависимость, полученную В. Г. Мацаком и Л. К. Хозяновым для процессов испарения внутри помещений [11]:

$$w = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{\mu} \cdot P_n \quad (6)$$

где P_n — давление насыщенных паров ЛВЖ, кПа. Этот параметр рассчитаем по уравнению Антуана

для максимальной температуры T_b с использованием принятых нами констант, результат расчета в MATLAB: $P_n = 14,8$ кПа;

η — поправка, которую положим равной 1, т. к. скорость ветра в атмосфере в диапазоне $0 \div 1$ м/с на высоте 10 м примерно соответствует штилевым условиям.

С учетом молярной массы диизопропилового эфира получаем оценку: $W = 0,00015$ кг/с · м². При максимальной продолжительности испарения 3600 с [4] масса паров эфира в ПВО составит $m_n = 774,2$ кг.

В модели [4] паровоздушное облако аппроксимировано цилиндром с отношением радиуса к высоте 30:1. Величины радиуса и высоты этого цилиндра рекомендовано находить по формулам:

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}; \quad (7)$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33}, \quad (8)$$

где ρ_n — плотность паров (при атмосферном давлении), кг/м³:

$$\rho_n = \frac{\mu}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_b)}, \quad (9)$$

V_0 — молярный объем, 22,4 м³/кмоль;

t_b — расчетная температура воздуха, °С, $t_b = T_b - 273,15$.

Результат расчета плотности паров (при наибольшей температуре, соответствующей максимуму массы паров в облаке) $\rho_n = 4,32$ кг/м³. Далее получаем оценки:

а) радиуса ПВО: $R_{\text{НКПР}} = 40,3$ м;

б) высоты ПВО: $Z_{\text{НКПР}} = 1,34$ м.

Средняя концентрация C_n паров в ПВО, рассчитываемая делением массы паров на объем цилиндра:

$$C_n = \frac{m_n}{V_{\text{ПВО}}} = \frac{m_n}{\pi \cdot R_{\text{НКПР}}^2 \cdot Z_{\text{НКПР}}}, \quad (10)$$

в консервативной постановке оказалась равна $C_n = 0,11$ кг/м³.

Объемная концентрация паров $C_{\text{по}}$, об. %, равна относительному объему, который будут занимать

пары ЛВЖ, если их привести к атмосферному давлению P_0 :

$$C_{\text{по}} = 100 \cdot \frac{C_n \cdot R \cdot T_b}{\mu \cdot P_0}. \quad (11)$$

Расчет по (11) дал следующую оценку: $C_{\text{по}} = 2,6$ об. %, которая превышает величину стехиометрической концентрации диизопропилового эфира. Следовательно, для оценки эффективного энергетического потенциала ПВО следует воспользоваться вторым соотношением (ПЗ.36) [4] (с учетом того обстоятельства, что плотность паров ЛВЖ превышает плотность воздуха):

$$E = 2 \cdot m_n \cdot Z \cdot E_{\text{уд}} \cdot \frac{C_{\text{ст}}}{C_{\text{по}}}. \quad (12)$$

Результат консервативной оценки энергетического потенциала ПВО в MATLAB по соотношению (12): $E = 4,82 \cdot 10^9$ Дж.

Безразмерное расстояние Сакса R_X рассчитывается по формуле

$$R_X = X \cdot \left(\frac{P_0}{E} \right)^{1/3}. \quad (13)$$

Учитывая, что при расчете параметров воздушной взрывной волны (ВВВ) этот параметр стоит в знаменателе, примем при его вычислении наименьшее расстояние X , тогда $R_X = 0,29$. Полученное значение меньше 0,34, поэтому согласно указаниям [4] при последующих вычислениях принимаем $R_X = 0,34$.

В консервативной постановке в качестве скорости фронта принимаем верхнюю границу интервала $u_{\text{фр}} = 500$ м/с.

Следуя далее алгоритму [4], рассчитаем по (14)—(16) безразмерные давление и импульс положительной фазы ВВВ:

$$P_{X1} = \left(\frac{u_{\text{фр}}}{u_{\text{зв}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_X} - \frac{0,14}{R_X^2} \right); \quad (14)$$

$$I_{X1} = W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left(\frac{0,06}{R_X} + \frac{0,01}{R_X^2} - \frac{0,0025}{R_X^3} \right); \quad (15)$$

$$W = \frac{u_{\text{фр}}}{u_{\text{зв}}} \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right), \quad (16)$$

где σ — степень расширения продуктов сгорания, для паровоздушных смесей допускается принимать

равной 7. Результаты расчетов этих параметров: $P_{X1} = 2,28$; $I_{X1} = 0,125$.

Значения параметров взрывной волны в размерной форме согласно [4] могут быть получены с помощью соотношений (17) и (18):

$$\Delta P = P_{X1} \cdot P_0; \quad (17)$$

$$I^+ = I_{X1} \cdot P_0^{2/3} \cdot \frac{\sqrt[3]{E}}{u_{зв}}. \quad (18)$$

Вычисления в MATLAB дали следующие значения:

а) избыточное давление BBB: $\Delta P = 230\ 300$ Па;

б) импульс фазы сжатия BBB: $I^+ = 1307$ Па · с.

Как известно, воздействие воздушной взрывной волны на человека, находящегося на открытой местности, чревато несколькими видами поражений:

а) поражением легких с возможным летальным исходом;

б) метательным действием — отбрасыванием тела человека, в результате которого человек может удариться головой или всем телом о твердую поверхность и погибнуть;

в) воздействием на барабанную перепонку, вызывающим глухоту.

Нормативная методика [4] не вдается в такие тонкости, прогнозирование ущерба при рассматриваемом сценарии аварии в вероятностной постановке она рекомендует выполнять с помощью пробит-функции. Для воздействия (не уточняется, какого именно — смертельного или нет) BBB на человека, находящегося вне здания, приведены формулы для пробит-функции:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln S, \quad (19)$$

$$S = \frac{4,2}{P_{X1}} + \frac{1,3}{i}, \quad (20)$$

где

$$\bar{i} = \frac{I^+}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}}, \quad (21)$$

где m — масса тела человека, кг, которую допускается приравнивать к 70 кг.

Интересно отметить, что в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [17],

утвержденном Ростехнадзором в 2015 году, выражением (19) оценивается вероятность наступления у человека состояния нокдауна (временной потери управляемости) после воздействия на него взрывной волны.

Результат точечного расчета в консервативной постановке:

$$S = 3,11; Pr = -1,51.$$

Условная вероятность поражения человека взрывной волной объемного взрыва по известному значению Pr может быть рассчитана с помощью стандартной функции ошибок:

$$P(Pr) = 0,5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (22)$$

Результат расчета: $\text{Prob} = 3,7 \cdot 10^{-11}$.

Столь малая величина условной вероятности поражения вызывает недоумение с учетом величины массы паров ЛВЖ в пределах ПВО более 700 кг, второго класса взрывного превращения и нахождения человека всего в восьми метрах от эпицентра взрыва (фактически внутри паровоздушного облака)!

В качестве альтернативы оценим условную вероятность смертельного поражения человека вследствие динамического действия BBB («взрывного ветра»), из-за которого тело пострадавшего может быть отброшено с последующим ударом о твердую поверхность. Руководство по безопасности [17] для расчета пробит-функции метательного поражения человека предлагает соотношение

$$Pr_{\text{мет}} = 5,0 - 2,44 \cdot \ln S_{\text{мет}}, \quad (23)$$

где

$$S_{\text{мет}} = \frac{7380 \cdot 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I^+}, \quad (24)$$

размерность ΔP — Па, I^+ — Па · с. Результат расчета: $\text{Prob}_{\text{мет}} = 2,1 \cdot 10^{-4}$.

С учетом принятых значений вероятности аварии и условной вероятности рассматриваемого сценария индивидуальный аварийный риск для персонала $R_{\text{инд}} = 4,26 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹.

Итак, нами получена точечная оценка индивидуального риска (с учетом только одного сценария!) при наиболее неблагоприятных значениях следующих параметров задачи: температуры атмосферного воздуха, количества ЛВЖ в резервуаре, величины

скорости фронта ВВВ, дислокации человека относительно эпицентра взрыва.

Точечный расчет в усредненной постановке. Повторим все вычисления, приписав всем интервальным параметрам значения, равные серединам соответствующих интервалов. Результаты расчета отражены в итоговой табл. 2, приведем здесь только наиболее важные оценки:

а) условная вероятность смертельного поражения человека из-за метательного действия взрыва:

$$\text{Prob}_{\text{мет}} = 1,6 \cdot 10^{-13};$$

б) индивидуальный аварийный риск:

$$R_{\text{инд}} = 3,1 \cdot 10^{-18} \text{ год}^{-1},$$

которые *очень существенно* (примерно в миллиард раз) отличаются в меньшую сторону от значений, полученных ранее в консервативной постановке.

2.2. Интервальный расчет индивидуального аварийного риска

2.2.1. Естественный (наивный) метод интервального расчета

На следующем этапе с учетом наличия неопределенности у ряда параметров перейдем к выполнению интервальных расчетов. Сначала все расчеты выполним средствами простой интервальной арифметики, которая является естественным интервальным расширением (natural interval extention) классического математического анализа. Мы будем называть его *естественным* (ранее его еще именовали *наивным*) интервальным методом. При выполнении расчетов в данной постановке не предпринимаются специальные меры по сужению интервальных результатов:

а) не минимизируется неоднократное вхождение одного и того же параметра в расчетное соотношение;

б) не учитывается наличие связей между параметрами (в частности, зависимости многих из них от температуры).

Согласно расчету в INTLAB объем V_0 ЛВЖ в резервуаре на момент аварии с учетом начальной массы m_0 и плотности $\rho_{\text{ж}}$ составляет $V_0 \in [39,9; 278,3] \text{ м}^3$, а начальный уровень h_0 при площади основания РВС-300, равной $45,1 \text{ м}^2$, является интервалом $h_0 \in [0,88; 6,2] \text{ м}$.

Следует отметить, что существенный перелив через обвалование возможен лишь при условии $h_0 > h_{\text{об}}$, поэтому интервал начального уровня h_0 следует разбить на два подынтервала:

а) $h_{01} \in [0,88; 2,7] \text{ м}$ — перелив очень незначителен, площадь пролива равна площади обвалования, $S_{\text{пр1}} = \pi \cdot R_{\text{об}}^2 = 167,0 \text{ м}^2$;

б) $h_{02} \in [2,7; 6,2] \text{ м}$ — площадь пролива рассчитывается по (6), $S_{\text{пр2}} \in [247; 1438] \text{ м}^2$.

В качестве обобщенной площади пролива примем величину интервальной оболочки $S_{\text{пр}} = \text{hull}(S_{\text{пр1}}, S_{\text{пр2}})$, $S_{\text{пр}} \in [167; 1438] \text{ м}^2$ (интервальной оболочкой множества S называется интервальный объект, наилучшим образом приближающий извне (т.е. объемлющий) рассматриваемое множество). Иначе говоря, это пересечение всех интервальных векторов (матриц), содержащих S [9]. Например, если $a = [-1,2; 3,5]$, $b = [2,1; 6,7]$, то $\text{hull}(a, b) = [-1,2; 6,7]$.

Давление насыщенных паров диизопропилового эфира в диапазоне температур $T_{\text{в}}$, рассчитанное по уравнению Антуана $P_{\text{н}} \in [2,8; 14,8] \text{ кПа}$.

При максимальной продолжительности испарения 3600 с получаем величину массы паров ЛВЖ в ПВО $m_{\text{п}} \in [17,2; 774,2] \text{ кг}$.

С учетом принятых нами значений молярной массы диизопропилового эфира и диапазона температур получаем оценку плотности его паров $\rho_{\text{п}} \in [4,31; 4,82] \text{ кг/м}^3$. Далее габариты паровоздушного облака, аппроксимированного цилиндром:

а) радиуса ПВО: $R_{\text{НКПР}} \in [10,9; 40,3] \text{ м}$;

б) высоты ПВО: $Z_{\text{НКПР}} \in [0,36; 1,34] \text{ м}$.

Средняя концентрация паров в ПВО, рассчитываемая делением массы паров на объем цилиндра при прямом расчете, дает значение в очень широком диапазоне $C_{\text{п}} \in [0,0025; 5,69] \text{ кг/м}^3$.

Расчет средней объемной концентрации паров в облаке по (11) дал следующую оценку: $C_{\text{по}} \in [0,05; 131] \text{ об. \%}$. Очевидно, что ширина полученного интервала $C_{\text{по}}$ весьма переоценена, поскольку верхняя его граница превышает 100%, что не имеет физического смысла. Таким образом, здесь естественный интервальный расчетный метод в первый раз дал сбой. Исправим полученный интервал, выполнив отсечку сверху: $C_{\text{по}} \in [0,05; 100] \text{ об. \%}$. Большая его часть лежит правее значения $C_{\text{ст}}$ для диизопропилового эфира.

Следовательно, с учетом нестроого неравенства первого уравнения (ПЗ.36) [3] этот интервал следует разбить на две части:

а) $C_{\text{по1}} \in [0,05; 2,24]$ об. %;

б) $C_{\text{по2}} \in [2,24; 100,0]$ об. %.

Массы паров $m_{\text{п1,2}}$ ПВО могут быть рассчитаны по уравнению Менделеева — Клапейрона:

$$m_{\text{п1,2}} = \frac{C_{\text{по1,2}} \cdot \mu \cdot P_0 \cdot V_{\text{ПВО}}}{100 \cdot R \cdot T_{\text{в}}}. \quad (25)$$

Прямая подстановка численных значений в (25) дала следующие результаты:

а) $m_{\text{п1}} \in [0,3; 746,9]$ кг;

б) $m_{\text{п2}} \in [13; 33\ 345]$ кг.

Результат расчета вновь неудовлетворителен, поскольку существенная часть второго интервала выходит за рамки полученного ранее интервала массы $m_{\text{п}}$ паров в облаке. Данный негативный эффект обусловлен неоднократным вхождением расчетных параметров в (25).

Продолжим интервальный расчет в его наиболее простой естественной версии, искусственно положив $m_{\text{п1,2}} = m_{\text{п}}$.

Для оценки эффективного энергетического потенциала ПВО воспользуемся обоими соотношениями (ПЗ.36 [4]) с учетом того обстоятельства, что плотность паров ЛВЖ превышает плотность воздуха, результат расчета $E \in [0,003; 5,59] \cdot 10^9$ Дж.

Полученная интервальная оценка параметра Сакса $R_X \in [0,2; 4,3]$. С учетом требования [4] нижнюю границу интервала R_X следует откорректировать: $R_X \in [0,34; 4,3]$.

Далее результаты расчета безразмерных параметров взрыва вновь разочаровали, поскольку получены не имеющие физического смысла отрицательные значения:

$$P_{X1} \in [-1,89; 4,5] \text{ и } I_{X1} \in [-0,043; 0,23].$$

На этом, в принципе, естественный интервальный расчет можно было бы остановить в третий раз. Искусственно отсечем эти области отрицательных значений, одновременно не допустив появления в знаменателе правой части (24) нульсодержащих интервалов, положив:

$$P'_{X1} \in [0,001; 4,5]; I'_{X1} \in [0,001; 0,23].$$

После этого расчет в INTLAB параметров взрывной волны в размерной форме дал следующие значения:

а) избыточное давление BVB

$$\Delta P \in [1000; 455\ 630] \text{ Па};$$

б) импульс фазы сжатия BVB

$$I^+ \in [0,8; 2616,5] \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Продолжая интервальный расчет в естественной постановке, получаем на следующем шаге очень широкие интервалы:

а) параметр $S \in [1,5; 6100]$;

б) пробит-функция $\text{Pr} \in [-45,0; 2,37]$;

в) условная вероятность Prob воздействия взрывной волны на персонал, оцененная по нормативной методике [4]:

$$\text{Prob} \in [0,0; 0,0042];$$

г) условная вероятность гибели персонала из-за метательного действия взрывной волны

$$\text{Prob}_{\text{мет}} \in [0,0; 0,4];$$

д) индивидуальный аварийный риск для персонала вследствие метательного действия взрыва

$$R_{\text{инд}} \in [0,0; 8,05 \cdot 10^{-6}] \text{ год}^{-1}.$$

Подытоживая, следует заключить, что интервальный расчет в его естественной версии в некоторых случаях не позволяет выполнить оценку целевых метрик аварийного риска.

2.2.2. Интервальный расчет с принятием специальных мер

Покажем, как специальные меры, перечисленные выше, позволяют существенно улучшить качество интервальных оценок метрик аварийного риска.

С целью ликвидации терминологической неопределенности условимся считать:

а) средней скоростью ветра — скользящее среднее, полученное по измерениям в атмосфере на высоте 10 м с осреднением 20 мин;

б) средней концентрацией горючего вещества в паровоздушном облаке — среднее, полученное осреднением за 2 мин.

Модельную неопределенность будем считать минимизированной, поскольку все расчеты бу-

дуг выполняться исключительно с использованием нормативной методики [4] (хотя все сказанное выше, в разделе 1, остается в силе).

На завершающем этапе неопределенность целевой метрики риска может быть уменьшена с учетом имеющейся статистически устойчивой информации о параметрах природно-эксплуатационной группы: а) о дислокации персонала в зоне поражения; б) исходной массе m_0 ЛВЖ в резервуаре.

Вычислительная неопределенность в рамках рассматриваемой задачи обусловлена:

1) неоднократным вхождением ряда параметров в некоторые расчетные соотношения (например, при расчете средней концентрации паров в паровоздушном облаке). Простейшие математические преобразования в ряде подобных случаев позволяют резко подавлять эффект паразитного уширения интервала результата;

2) зависимостью таких параметров задачи, как давление насыщенного пара ЛВЖ P_n , плотности жидкой $\rho_{ж}$ и паровой ρ_n фаз ЛВЖ от температуры T_v . С целью минимизации данного негативного явления может быть рекомендован следующий способ: интервал параметра, являющегося аргументом (в рассматриваемом случае T_v), может быть разбит на достаточно большое число подынтервалов T_{vj} ($j = 1, 2, \dots, N$). Таким образом, интервальные параметры (независимый T_v и зависимые — P_n , $\rho_{ж}$ и ρ_n) окажутся представленными интервальными векторами (брусами). При этом компоненты брусков P_{nj} , $\rho_{жj}$ и ρ_{nj} будут рассчитаны по известным зависимостям $P_n(T)$, $\rho_{ж}(T)$ и $\rho_n(T)$ для каждого подынтервала T_{vj} . В качестве результата для каждой из них следует принять интервальную оболочку $\text{hull}(R_{Xj})$, $j = 1, 2, \dots, N$.

Исследуем применение данных мер поэтапно.

Подавление эффекта неоднократного вхождения параметров. На первом этапе уменьшим вычислительную неопределенность, заметив, что при расчете средней концентрации паров диизопропи-

лового эфира внутри ПВО по соотношению (10) интервальные параметры m_n , ρ_n , $C_{\text{НКПР}}$, T_v входят в него неоднократно. Полученная в ходе естественного интервального расчета по (10) оценка может быть значительно улучшена исключением их повторного вхождения:

$$C_n = \frac{m_n \cdot \rho_n \cdot C_{\text{НКПР}}}{7,8^2 \cdot 0,26 \cdot 3,14 \cdot m_n} = \frac{\rho_n \cdot C_{\text{НКПР}}}{49,69}. \quad (26)$$

Результат расчета по (26)

$$C_n \in [0,11; 0,126] \text{ кг/м}^3$$

существенно уже прежней оценки

$$C_n \in [0,0025; 5,69] \text{ кг/м}^3.$$

Аналогично поступим, модифицируя соотношение (15) при расчете безразмерного импульса взрыва, исключая повторное вхождение в формулу параметра W :

$$I_{x1} = \frac{1}{R_x} \cdot (0,625 - 0,4 \cdot (W - 1,25)^2) \cdot \left(0,06 + \frac{0,01}{R_x} - \frac{0,0025}{R_x^2} \right). \quad (27)$$

Относительно R_x подобное простое преобразование выполнить не удастся, поэтому воспользуемся приемом Раймона Мура, разбивая интервал R_x на M подынтервалов, а затем вычисляя их интервальные оболочки. Покажем, как результат вычислений зависит от M , на примере безразмерного избыточного давления взрыва (табл. 1).

Анализ табл. 1 показывает, что сужение интервала происходит в основном за счет уменьшения его верхней границы, причем после $M = 5000$ изменения происходят только в третьем знаке после запятой. Таким образом, при $M = 5000$ достигнута точность, вполне достаточная для инженерных приложений.

Следует отметить, что использованный нами простой метод Р. Мура очень затратен в плане потребного машинного времени. В интервальном анализе достаточно давно разработаны значительно более эффективные методы поиска области значений интервальных функций [9], имеются специ-

Зависимость результата вычислений P_x от числа подынтервалов

Таблица 1

Число M	10	50	100	500	1000	5000	10 000
P_x	[0,36; 3,18]	[0,36; 2,52]	[0,36; 2,40]	[0,36; 2,31]	[0,36; 2,29]	[0,36; 2,28]	[0,36; 2,28]

альные программные коды, позволяющие решать эту проблему. Видимо, исследованию этих методов следует посвятить отдельную работу, в данной же статье на первый план нами вынесен именно методический аспект проблемы.

Аналогичным способом рассчитаем безразмерные параметры взрывной волны. Результаты расчета таковы:

- избыточное давление взрыва $P_{X1} \in [0,36; 2,28]$;
- импульс положительной фазы $I_{X1} \in [0,026; 0,124]$.

Полученные оценки параметров: 1) $S \in [3,06; 33,69]$ и 2) $Pr \in [-15,19; -1,42]$ также значительно сужены относительно их «наивных» оценок.

Рассчитанный интервал условной вероятности поражения $Prob \in [0,0; 6,72 \cdot 10^{-10}]$.

Условная вероятность гибели персонала из-за метательного действия взрывной волны $Prob_{мет} \in [0,0; 3,0 \cdot 10^{-4}]$.

Окончательно интервальная оценка индивидуального аварийного риска для персонала вследствие метательного действия взрыва $R_{инд} \in [0,0; 6,13 \cdot 10^{-9}] \text{ год}^{-1}$ значительно уже результата естественного интервального расчета.

Таким образом, нивелирование эффекта неоднократного вхождения параметров интервальной природы в расчетные соотношения позволило резко улучшить результаты расчета метрик риска.

Учет эффекта взаимозависимости параметров. На втором этапе дополнительно уменьшим вычислительную неопределенность, обратив внимание на зависимость ряда параметров задачи (P_n , $\rho_{ж}$ и ρ_n) от температуры атмосферного воздуха T_b . Разобьем интервал $T_b \in [261; 292]$ К на 31 подынтервал шириной 1 К.

Дополнительная польза подобного разбиения заключается в том, что оно дает возможность выполнять расчеты более дифференцированно для теплого ($T_b > 273,15$ К) и холодного периодов года. Так, появляется возможность учесть наличие в холодный период года снежного покрова, благодаря которому площадь пролива равна площади обвалования независимо от возможности перелива.

В результате учета вышеперечисленных обстоятельств на данном этапе получено некоторое улучшение интервальных оценок метрик риска (не столь радикальное, как на предыдущем): например, для

среднеобъемной концентрации паров в пределах ПВО получена оценка $C_{по} \in [2,59; 2,61]$ об. %, которая несколько сужена относительно прежней $C_{по} \in [2,32; 2,91]$ об. %. То же касается энергетического потенциала ПВО ($E \in [0,11; 4,83] \cdot 10^9$ Дж вместо $E \in [0,095; 5,38] \cdot 10^9$ Дж) и параметра Сакса ($R_X \in [0,34; 1,28]$ вместо $R_X \in [0,34; 1,32]$).

Метод расчета безразмерных параметров взрыва не отличается от использованного на предыдущем этапе, результаты представлены ниже (нижние границы чуть улучшены за счет лучшей величины параметра Сакса):

- избыточное давление взрыва: $P_{X1} \in [0,38; 2,28]$ вместо $P_{X1} \in [0,36; 2,28]$;
- импульс положительной фазы: $I_{X1} \in [0,027; 0,125]$ вместо $I_{X1} \in [0,026; 0,125]$.

Интервал пробит-функции поражения человека взрывной волной: $Pr \in [-14,84; -1,51]$, было $Pr \in [-15,19; -1,42]$.

Рассматривая метательное действие взрыва, получаем оценку гибели персонала:

- условная вероятность смертельного поражения: $Prob_{мет} \in [0,0; 2,18 \cdot 10^{-4}]$ вместо $[0,0; 3,0 \cdot 10^{-4}]$;
- индивидуальный аварийный риск: $R_{инд} \in [0,0; 4,37 \cdot 10^{-9}]$ вместо $[0,0; 6,1 \cdot 10^{-9}] \text{ год}^{-1}$.

Учет имеющейся информации о поведении величины параметров внутри интервалов. На третьем этапе интервальных вычислений неопределенность метрик риска может быть значительно уменьшена, если имеется надежная статистически устойчивая информация о распределении величины параметров внутри интервалов их изменений.

Применительно к рассматриваемой задаче предположим, что достоверно известно следующее:

1) 20% времени ($P_{X1} = 0,2$) персонал находится на удалении $X_1 \in [8, 10]$ м от центра резервуара, 70% времени ($P_{X2} = 0,7$) — на расстоянии $X_2 \in [10, 13]$ м, оставшиеся 10% времени ($P_{X3} = 0,1$) — на удалении $X_3 \in [13, 15]$ м;

2) согласно эксплуатационной документации на резервуар масса m_0 ЛВЖ в нем: а) в течение 20% времени $m_{01} \in [30\ 000, 100\ 000]$ кг; б) 50% времени — $m_{02} \in [100\ 000, 170\ 000]$ кг и в) 30% времени — $m_{03} \in [170\ 000, 200\ 000]$ кг.

Запишем эти входные параметры задачи в матричной форме: $m_0 = [m_{01}, m_{02}, m_{03}; P_{01}, P_{02}, P_{03}]$ и $X = [X_1, X_2, X_3; P_{X1}, P_{X2}, P_{X3}]$. Идея метода заключается

в том, что при вычислении интервальной оболочки находят крайние точки области значений величины (наименьшее и наибольшее). Очевидно, что для класса монотонных функций (а используемые в области оценки риска функции являются таковыми) эти «маргинальные» значения определяются границами относительно редких подынтервалов X_j и m_{0j} , т.е. тех, чьи вероятности малы. В предположении о статистической независимости m_{0i} и X_j справедливо положить, что $P_{ij} = \text{Вероятность}(\Delta P_{ij} \text{ или } I_{ij}^+) = P_{0i} \cdot P_{Xj}$. В рассматриваемом примере матрица вероятностей P_{ij} :

0.0400	0.1400	0.0200
0.1000	0.3500	0.0500
0.0600	0.2100	0.0300

Теперь переопределим элементы интервальных матриц безразмерного избыточного давления и импульса, приняв, что $P_{x1ij} = \text{infsup}(\text{mid}(P_{x1}), \text{mid}(P_{x1}))$ и $I_{x1ij} = \text{infsup}(\text{mid}(I_{x1}), \text{mid}(I_{x1}))$, если

$P_{ij} < 0,2 \cdot \max(P_{ij})$. Иначе говоря, интервальные значения тех элементов матриц, чьи вероятности меньше 20% от максимального элемента матрицы P_{ij} , приравниваются к середине интервалов P_{x1} и I_{x1} , которые являются интервальными оболочками матриц P_{x1ij} и I_{x1ij} соответственно. После этого вновь выполняется операция вычисления интервальных оболочек переопределенных матриц P_{x1ij} и I_{x1ij} .

Как показано в табл. 2, этот метод позволил несколько уменьшить ширину интервальных параметров (безразмерных избыточного давления P_{x1} и импульса взрыва I_{x1}).

Результаты всех вычислений сведем в итоговую табл. 2.

Заключение

Анализ итоговой таблицы показывает, что интервальные методы расчета риска позволяют учитывать и оперировать с неопределенностью, присутствующей параметрам задачи. В результате вычислений метрики аварийного риска в интервальной поста-

Результаты расчета параметров задачи различными методами

Таблица 2

Параметр	Точечный расчет		Интервальный расчет			
	в консервативной постановке	усредненный	естественный (наивный)	с минимизацией повторного вхождения параметров	с учетом взаимозависимости параметров	с учетом информации о поведении параметра внутри интервала
Плотность жидкой фазы ЛВЖ, кг/м ³	752,2	735,4	[718,7; 752,2]	[718,7; 752,2]	[718,7; 752,2]	[718,7; 752,2]
Площадь пролива, м ²	1438	568,3	[167; 1438]	[167; 1438]	[167; 1438]	[167; 1438]
Давление насыщенного пара, кПа	14,8	6,8	[2,8; 14,8]	[2,8; 14,8]	[2,8; 14,8]	[2,8; 14,8]
Масса паров ЛВЖ в ПВО, кг	774,1	141,3	[17,2; 774,2]	[17,2; 774,2]	[17,2; 774,2]	[17,2; 774,14]
Средняя концентрация паров ЛВЖ в ПВО, кг/м ³	0,11	0,12	[0,0025; 5,69]	[0,11; 0,126]	[0,11; 0,126]	[0,11; 0,126]
Средняя объемная концентрация паров в ПВО, об. %	2,6	2,6	[0,05; 131,06] [0,05; 100,0]	[2,32; 2,91]	[2,59; 2,61]	[2,59; 2,61]
Эффективный энергипотенциал ПВО, Дж	$4,82 \cdot 10^9$	$8,8 \cdot 10^8$	$[0,003; 5,59] \cdot 10^9$	$[0,095; 5,38] \cdot 10^9$	$[0,11; 4,83] \cdot 10^9$	$[0,11; 4,83] \cdot 10^9$
Параметр Сакса	0,34 (0,29)	0,51	[0,34; 4,31]	[0,34; 1,32]	[0,34; 1,28]	[0,34; 1,28]

Окончание табл. 2

Параметр	Точечный расчет		Интервальный расчет			
	в консервативной постановке	усредненный	естественный (наивный)	с минимизацией повторного вхождения параметров	с учетом взаимозависимости параметров	с учетом информации о поведении параметра внутри интервала
Безразмерное избыточное давление	2,28	1,29	[–1,89; 4,51] [0,001; 4,51]	[0,36; 2,28]	[0,38; 2,28]	[0,4; 2,26]
Безразмерный избыточный импульс	0,125	0,082	[–0,043; 0,23] [0,001; 0,23]	[0,026; 0,124]	[0,027; 0,125]	[0,03; 0,11]
Параметр S	3,11	6,63	[1,5; 6100]	[3,06; 33,69]	[3,11; 31,74]	[3,22; 29,2]
Параметр Pr	–1,51	–5,86	[–45,0; 2,37]	[–15,19; –1,42]	[–14,85; –1,51]	[–14,37; –1,72]
Условная вероятность смертельного поражения человека ВВВ по [4]	$3,66 \cdot 10^{-11}$	10^{-16}	[0,0; 0,0042]	[0,0; $6,72 \cdot 10^{-10}$]	[0,0; $3,85 \cdot 10^{-11}$]	[0,0; $8,95 \cdot 10^{-12}$]
Условная вероятность смертельного поражения человека из-за метательного действия ВВВ по [17]	$2,13 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	[0,0; 0,4]	[0,0; $3,0 \cdot 10^{-4}$]	[0,0; $2,18 \cdot 10^{-4}$]	[0,0; $1,0 \cdot 10^{-4}$]
Индивидуальный аварийный риск, год ^{–1}	$4,26 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-18}$	[0,0; $8,05 \cdot 10^{-6}$]	[0,0; $6,13 \cdot 10^{-9}$]	[0,0; $4,37 \cdot 10^{-9}$]	[0,0; $2,1 \cdot 10^{-9}$]

новке результат также представлен интервалом, что совершенно естественно и адекватно ситуации с аварийной безопасностью реальных опасных объектов техносферы.

При этом расчеты в классической (естественной) версии интервальной арифметики из-за ее специфических особенностей зачастую не могут быть выполнены должным образом, поскольку приводят к непропорциональному росту ширины интервала результата вычислений. В результате этого, например, под знаком радикала может оказаться интервал с отрицательной областью значений. С методической целью в статье рассмотрены наиболее простые способы преодоления этих отрицательных эффектов интервального анализа. Они проиллюстрированы расчетом аварийного риска условного опасного объекта — склада ЛВЖ. Итоговая табл. 2 демонстрирует, как последовательное применение этих методов позволяет уменьшать ширину рассчитанных интервальных параметров.

Следует указать, что в современном интервальном анализе используются существенно более эффективные способы поиска области значений функции, нежели описанные в данной работе. Повидимому, этой интересной теме следует посвятить отдельную статью.

Укажем, что использование имеющейся информации о поведении ряда параметров задачи внутри их интервалов позволило нам сузить интервал целевой метрики — величины индивидуального аварийного риска.

Литература

1. Колесников Е.Ю. Количественная оценка неопределенности пожарного риска. Сценарий аварии «Пожар пролива ЛВЖ» // Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11. № 4. С. 52—66.
2. Колесников Е.Ю. Анализ неопределенности пожарного риска: Монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. 204 с.

3. Колесников Е.Ю. Интервально-матричный метод количественной оценки пожарного риска на примере склада жидкого аммиака // Проблемы анализа риска. 2015. Т. 12. № 4. С. 28—41.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утв. Приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404 в редакции приказа МЧС России от 14.12.2010 № 649 «О внесении изменений в приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404».
5. World bank technical paper number 55. Techniques for Assessing Industrial Hazards. A Manual. Washington D.C., 1988. 170 p.
6. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. 2-nd ed. AIChE/CCPS, 2000. 744 p.
7. CPR-14E Methods for the calculation of Physical Effects 3rd. ed. The Hague, 2005. 870 p.
8. Moore Ramon E., Baker Kearfott R., Cloud Michael J. Introduction to interval analysis. SIAM, Philadelphia, 2009. 234 p.
9. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2015. 605 с. <http://www.nsc.ru/interval> (дата обращения 10.12.2015).
10. Хансен Э., Уолстер Дж. У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. Институт компьютерных исследований, 2012. 516 с.
11. Колесников Е.Ю. К расчету массовой скорости испарения опасных веществ // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8. № 5. С. 86—93.
12. СП 131.13330.2012 Строительная климатология.
13. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: В 2 кн.; кн. 1 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. М.: Химия, 1990. 496 с.
14. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: Руководство. М.: ВНИИПО, 2002. 78 с.
15. Зверев А.С., Кирюхин Б.В., Кондратьев К.Я и др. Курс метеорологии (физика атмосферы): Учеб. пособие / Под ред. П.Н. Тверского. Л.: Гидрометеиздат, 1951. 888 с.
16. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
17. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (2015).

Сведения об авторах

Колесников Евгений Юрьевич: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Поволжского государственного технологического университета

Число публикаций: более 80, в том числе монографий, учебников и учебных пособий — 8

Область научных интересов: методология анализа техногенного риска, количественная оценка неопределенности

Контактная информация:

Адрес: 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

Тел.: +7 (362) 268-28-76

E-mail: e.konik@list.ru

Колодкин Владимир Михайлович: доктор технических наук, профессор Удмурдского государственного университета, директор Института гражданской защиты

Число публикаций: более 200

Область научных интересов: риск-анализ, информационные технологии

Контактная информация:

Адрес: 426000, г. Ижевск, ул. Родниковая, д. 70, кв. 60

Тел.: +7 (3412) 91-60-85

E-mail: kolodkin@rintd.ru