



УДК 614.8:627.8

В.И. Гуменюк, А.М. Кармишин, В.А. Киреев

О КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

V.I. Gumenjuk, A.M. Karmishin, V.A. Kireev

ABOUT QUANTITATIVE INDICATOR OF DANGER MAN-MADE ACCIDENTS

Рассматриваются вопросы обоснования наиболее полных и интегральных пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий и общие интегральные представления для их оценки. формулируются практически важные задачи, которые должны решаться с использованием обоснованных показателей

ТЕХНОГЕННАЯ АВАРИЯ. НАСЕЛЕНИЕ. ПЕРСОНАЛ. ОБОБЩЕННЫЙ ФАКТОРНО-ВРЕМЕННОЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ. СТЕПЕНЬ ТЯЖЕСТИ ПОРАЖЕНИЯ. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПАСНОСТИ.

Problems of substantiation of total and integral spatial-temporal hazard indices of anthropogenic emergencies as well as general integral representations for their evaluation are considered. Practically important tasks which have to be solved with the use of theoretically justified indices are defined.

ANTHROPOGENIC EMERGENCY. POPULATION. STAFF. GENERALIZED FACTORIAL-TEMPORAL EXPOSURE LAW. EXTENT OF EXPOSURE. SPATIAL-TEMPORAL HAZARD INDICES.

Среди важнейших задач обеспечения промышленной безопасности — обоснование показателей опасности техногенных аварий и разработка методов их теоретической оценки.

Промышленная безопасность складывается из двух составляющих: безопасности персонала и населения при штатном функционировании предприятий и безопасности персонала и населения при возникновении на предприятиях техногенных аварий различной природы. В современном мире в силу объективных и субъективных причин опасность техногенных аварий возрастает, поэтому обеспечение безопасности персонала и населения, особенно при расположении потенциально опасных промышленных объектов в (около) крупных населенных пунктах, — чрезвычайно важно и актуально [1].

Понятие «безопасность» — аксиоматично, не требует определения. Невозможно ввести количественный показатель собственно безопасности, но можно ввести количественный показатель опасности, уровень которой определяет и уровень безопасности. О безопасности судят по уровню потенциальной или реализованной опасности. Если уровень опасности не

превосходит некоторого директивно заданного значения, то делается вывод о безопасности для персонала промышленного объекта и населения. Качественно можно вводить различные уровни безопасности в зависимости от того, какой существует уровень опасности (потенциальной или реализованной). Из изложенного следует, что для суждения о безопасности или ее уровнях необходимо уметь оценивать опасность потенциально опасного промышленного объекта, в том числе и при аварии на нем.

Следует отметить, что в общем случае поражающее действие аварий на потенциально опасных промышленных объектах, а особенно химически, биологически и радиационно опасных, как известно, реализуется в пространстве и времени. В связи с этим показатели опасности техногенных аварий должны непосредственно характеризовать эти два свойства.

Обоснование пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий и разработка теоретических методов их оценивания — актуальная научная проблема, требующая решать практически важные задачи:

ранжировать объекты по уровню опасности;

вырабатывать технические и, на этой основе, управленческие решения по снижению опасности до допустимого (психологически приемлемого) уровня на различных этапах жизненного цикла объекта (проектирование, эксплуатация, вывод из эксплуатации);

обосновывать требования к системе защиты персонала и населения, в том числе и по оперативности ее функционирования;

оптимизировать распределение выделяемых финансовых ресурсов на снижение опасности промышленного объекта по критерию максимального снижения его потенциальной опасности и т. п.

Несмотря на актуальность оценивания опасности техногенных аварий (катастроф), до настоящего времени существует ряд принципиальных нерешенных проблем [1]:

отсутствуют общепринятые показатели опасности техногенных аварий потенциально опасных промышленных объектов и соответствующие методы их теоретической оценки;

практически не разработаны стохастические методы описания последствий техногенных аварий, что не позволяет гарантированно оценивать уровень их опасности;

существующие методики оценки последствий техногенных аварий разработаны для простейших случаев, когда есть только один поражающий фактор, и не учитывают комбинированного действия поражающих факторов, в результате которого происходит усиление (синергизм) поражающего действия аварий.

При обосновании показателей последствий техногенных аварий широко применяются идеи квалиметрии. Применительно к рассматриваемой проблеме с позиции квалиметрии возникают четыре принципиальных проблемы:

квантификация, т. е. разработка количественных показателей опасности техногенных аварий;

детерминизация, т. е. освобождение от стохастических факторов либо их использование для получения детерминированных оценок показателей опасности;

освобождение от неопределенных факторов, т. е. разработка системы ограничений и допущений с учетом неопределенных факторов;

скаляризация, т. е. получения скалярных, а не векторных показателей опасности.

В рамках решения проблемы квантификации обосновано, что показатели опасности техногенных аварий можно разделить на пространственные и временные.

Пространственными показателям опасности являются следующие [1]:

вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести человека (элементарного объекта), находящегося в точке (x, y) относительно аварийного объекта. Это простейший (локальный, дифференциальный) показатель опасности, он далеко не в полной мере характеризует опасность техногенной аварии, так как можно выбрать сколь угодно много точек (x, y) , вероятность поражения на которых может изменяться от 0 до 1;

средняя вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести на некоторой площади S_p (следует отметить, что площади со средней вероятностью поражения соответствует та же площадь с некоторой граничной вероятностью поражения S_p). Это более полный показатель опасности по отношению к рассмотренному выше, но и он далеко не в полной мере характеризует опасность аварии, так как можно выбрать множество изолиний с различными вероятностями поражения, в пределах которых будут находиться большие или меньшие площади;

поле вероятностей поражения не ниже заданной степени тяжести, или, другими словами, координатный закон поражения, который можно рассматривать как наиболее полный показатель опасности аварий, позволяющий получать другие показатели опасности более высокого уровня.

В отношении временных характеристик необходимо отметить, что, с одной стороны, поле поражающего фактора при техногенной аварии формируется не мгновенно, а в течение некоторого времени, а с другой стороны, поражающее действие многих факторов, например токсичных химических веществ, в аварийном состоянии также проявляется не мгновенно, а в течение некоторого времени.

В связи с этим к простейшим временным показателям опасности техногенных аварий [2, 3] относят:

время проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести в заданной точке пространства;



продолжительность проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести в заданной точке пространства.

Наиболее полными временными показателями опасности техногенной аварии (по аналогии с пространственными) будут перечисленные выше показатели, отнесенные ко всей площади поражения:

закон распределения случайного времени проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести у населения на всей площади поражающего действия $G(t)$;

закон распределения случайной продолжительности проявлений эффектов поражения у населения (персонала) на всей площади поражающего действия $G(\tau)$;

Из всех рассмотренных временных показателей принципиальное значение имеет закон распределения случайного времени проявления поражений не ниже заданной степени тяжести (временной закон поражения), так как именно он непосредственно характеризует временную реализацию опасности техногенной аварии. Этот закон описывает вероятность того, что время проявления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести на всей площади поражения будет меньше некоторой величины:

$$F(t) = P\{\tilde{t} < t\}. \quad (1)$$

Данный закон можно рассматривать как временной аналог координатного закона поражения.

Получено общее интегральное представление закона (1), которое в некоторых частных случаях имеет аналитическое решение

$$G(t) = \int_0^t \frac{\int_0^{S_n} P(D) f_N(S) f_{N_n}(t) dS(D)}{\int_0^{S_n} P(D) f_N(S) dS(D)} dt, \quad (2)$$

где S_n — общая площадь поражающего действия техногенной аварии, $[L^2]$; $f_N(S)$ — плотность распределения населения в пределах площади S_n , $[L^{-2}]$; $P(D)$ — факторный закон поражения; $f_{N_n}(t)$ — плотность распределения случайного времени наступления эффектов поражения заданной степени тяжести при действии при действии поражающего фактора величиной D , $[T^{-1}]$; t — время, прошедшее после воздействия поражающего фактора, $[T]$.

Если население в пределах общей площади поражающего действия аварии распределено равномерно, то из соотношения (2) следует взаимосвязь наиболее полных пространственных и временных показателей и интегрального пространственного показателя опасности техногенной аварии:

$$\begin{aligned} G(t) &= \int_0^t \frac{\int_0^{S_n} P(D) f_{N_n}(t) dS(D)}{\int_0^{S_n} P(D) dS(D)} dt = \\ &= \int_0^t \frac{\int_0^{S_n} P(D) f_{N_n}(t) dS(D)}{\int_0^{S_n} P(D) dS(D)} dt = \\ &= \frac{1}{S_0} \int_0^{S_n} G_t(S) dS = \frac{S_0(t)}{S_0}, \quad (3) \end{aligned}$$

где $\int_0^t P(D) f_{N_n}(t) dS(D) = G_t(S) = G_t(x, y)$ — координатный закон поражений не ниже заданной степени тяжести, наступающих к моменту времени t ; $S_0 = \int_0^{S_n} P(D) dS(D)$ — приведенная зона поражения, $[L^2]$.

Несмотря на то, что координатный и временной законы поражения являются сложными функциями и зачастую могут быть рассчитаны только численными методами, по ним достаточно сложно анализировать и сравнивать различные техногенные аварии, в интересах, например, ранжирования промышленных объектов по степени опасности.

В связи с этим в интересах решения проблемы скаляризации в рассмотрение можно ввести пространственные и временные интегральные показатели опасности техногенных аварий.

В качестве пространственных интегральных показателей опасности в настоящее время рассматриваются начальные и центральные моменты КЗП. Так, начальные моменты КЗП порядка $\alpha + s$ записываются следующим образом:

$$m_{\alpha,s} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^\alpha y^s G(x, y) dx dy. \quad (4)$$

Если $v = s = 0$, то говорят о нулевом начальном моменте КЗП

$$m_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) dx dy = S_0, \quad (5)$$

который в силу особой важности получил специальные обозначение A_0 и название «приведенная зона поражения».

Следует отметить, что приведенная зона поражения имеет различные трактовки:

геометрическую — как условной площади, в пределах которой элементарный объект получает поражение не ниже заданной степени тяжести с вероятностью равной единице;

трактовку с точки зрения КЗП, которая считает приведенную зону поражения простейшей, одноступенчатой аппроксимацией КЗП (может использоваться при обосновании эффективности осуществляемых мероприятий защиты населения)

$$G(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } x, y \in A_0; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

*трактовку с позиций квалиметрии** — как главного (интегральный, обобщенный) показателя опасности техногенной аварии; он может применяться для решения различных практически важных задач, например ранжирования объектов по степени их опасности в интересах принятия управленческих решений.

Аналогичные идеи можно применить и для временного закона поражения. Однако начальный момент от $F(t)$ порядка α не существует, так как интеграл

$$\int_0^{\infty} t^{\alpha} F(t) dt = \infty$$

является расходящимся.

Однако можно найти начальные моменты порядка α от функции $1 - F(t) = q(t)$, которая описывает вероятность того, что к заданному моменту времени у пораженного населения эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести еще не проявятся:

$$m_{\alpha} = \int_0^{\infty} t^{\alpha} [1 - F(t)] dt. \quad (6)$$

* Квалиметрия — наука о количественных показателях качества технической продукции

Тогда при $\alpha = 0$ будем иметь нулевой начальный момент, который также получил специальные обозначение t_0 и название «приведенное время непоражения»:

$$t_0 = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt. \quad (7)$$

Исходя из выражения (7) под приведенным временем непоражения понимают условное время, в течение которого с вероятностью равной единице поражения не ниже заданной степени тяжести у пораженного населения не проявятся [1, 3].

Из определения приведенного времени непоражения следует: чем оно меньше, тем быстрее реализуется опасность техногенной аварии и тем более опасна рассматриваемая авария.

По аналогии с интегральным пространственным показателем опасности аварии — приведенной зоной поражения — интегральному временному показателю опасности — приведенному времени непоражения — можно дать следующие трактовки:

геометрическую трактовку как условного времени, в течение которого у пораженных не проявляются эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести (обосновывалось выше);

трактовку с точки зрения временного закона поражения как простейшей, одноступенчатой аппроксимации временного закона поражения

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq t_0; \\ 1, & \text{если } t > t_0; \end{cases}$$

трактовку с позиций квалиметрии, которая считает приведенное время непоражения главной (интегральная, скалярная) временной характеристикой опасности аварии (ведением в рассмотрение приведенного времени непоражения решена проблема скаляризации временных показателей опасности аварии).

Можно показать, что приведенное время непоражения численно равно математическому ожиданию случайного времени проявления эффектов поражения на всем поле поражающего действия техногенной аварии.

Все пространственные и временные показатели опасности техногенных аварий по своей сути являются непрерывными случайными ве-

Виды законов поражения

Название закона	Интегральное представление	Учитываемые случайные величины (вариабельность объектов)
<i>Факторные законы</i>		
Условный статический	$P_{yc}(D, D_{50}) = \int_0^D \varphi(\tilde{D}) d\tilde{D}$	Токсодоза \tilde{D} , вызывающая заданный эффект поражения
Условный динамический	$P_{yb}(D, D_{50}) = \int_0^\infty P_{yc}(D, D_{50}) f(D) dD$	Токсодоза D в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{6c}(D, D_{50}) = \int_0^\infty P_{yc}(D, D_{50}) f(D_{50}) dD_{50}$	Оценка величины D_{50}
Безусловный динамический	$P_{6d}(D, D_{50}) = \int_0^\infty \int_0^\infty P_{yc}(D, D_{50}) f(D_{50}) f(D) dD dD_{50}$	Токсодоза D в заданной точке x, y ; оценка величины D_{50}
<i>Факторно-временные законы</i>		
Условный статический	$P_{yc}(D, t) = \int_0^D \int_0^t \varphi(\tilde{D}, \tilde{t}) d\tilde{t} d\tilde{D}$	Токсодоза \tilde{D} , вызывающая заданный эффект поражения, и время его проявления
Условный динамический	$P_{yd} = \int_0^\infty P(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D) dD$	Токсодоза D в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{6c} = \int_0^\infty \int_0^\infty P(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D_{50}) \varphi(t_{50}) dD_{50} dt_{50}$	Оценки величин D_{50} и t_{50}

Название закона	Интегральное представление	Учитываемые случайные величины (вариабельность объектов)
Безусловный динамический	$P_{\text{б.д}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{\text{yc}}(D, D_{50}, t, t_{50}) \varphi(D) \varphi(D_{50}) \varphi(t_{50}) dD dD_{50} dt_{50}$	Токсодоза D в заданной точке x, y ; оценки величин D_{50} и t_{50}
<p><i>Двумерный факторный закон (при комбинированном действии двух поражающих факторов)</i></p>		
Условный статический	$P_{\text{yc}} = 1 - \int_{D_A}^{\infty} \int_{D_B}^{\infty} \varphi(\tilde{D}_A, \tilde{D}_B) d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B$	Токсодозы двух АХОВ \tilde{D}_A и \tilde{D}_B , вызывающих заданный эффект поражения
Условный динамический	$P_{\text{уд}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P(D_A, D_{A,50}, D_B, D_{B,50}) \varphi(D_A, D_B) dD_A dD_B$	Токсодозы D_A и D_B в заданной точке x, y
Безусловный статический	$P_{\text{б.с}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left(1 - \int_{D_A}^{\infty} \int_{D_B}^{\infty} \varphi(\tilde{D}_A, D_{A,50}, \tilde{D}_B, D_{B,50}) d\tilde{D}_A d\tilde{D}_B \right) \varphi(D_{A,50}, D_{B,50}) dD_{A,50} dD_{B,50}$	Оценки величин D_{50} и t_{50}
Безусловный динамический	$P_{\text{б.д}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{\text{yc}}(D_A, D_{A,50}, D_B, D_{B,50}) \varphi(D_A, D_B) \varphi(D_{A,50}, D_{B,50}) dD_A dD_B dD_{A,50} dD_{B,50}$	Токсодозы D_A и D_B в заданной точке x, y ; оценки величин D_{50} и t_{50}

личинами или функциями, что объясняется следующими причинами:

математические модели, описывающие формирование полей поражающих факторов по существу описывают их математические ожидания, например поле экспозиционных доз при авариях на химически опасных объектах. В реальных условиях протекания аварий и формирования полей поражающих факторов последние являются случайными, что необходимо учитывать при оценке пространственных и временных показателей опасности техногенных аварий;

параметры факторных и факторно-временных законов поражения [4, 5], описывающих вероятность наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести к заданному моменту времени в зависимости от величины действующего поражающего фактора, с одной стороны, — это параметрами генеральной совокупности, а с другой, — их численные значения находят только из результатов специально поставленных экспериментов, например токсикологических. Поэтому численные значения параметров — лишь оценка параметров генеральной совокупности и, как всякая оценка, являются непрерывными случайными величинами.

В связи с этим применительно к решению проблемы детерминизации в зависимости от

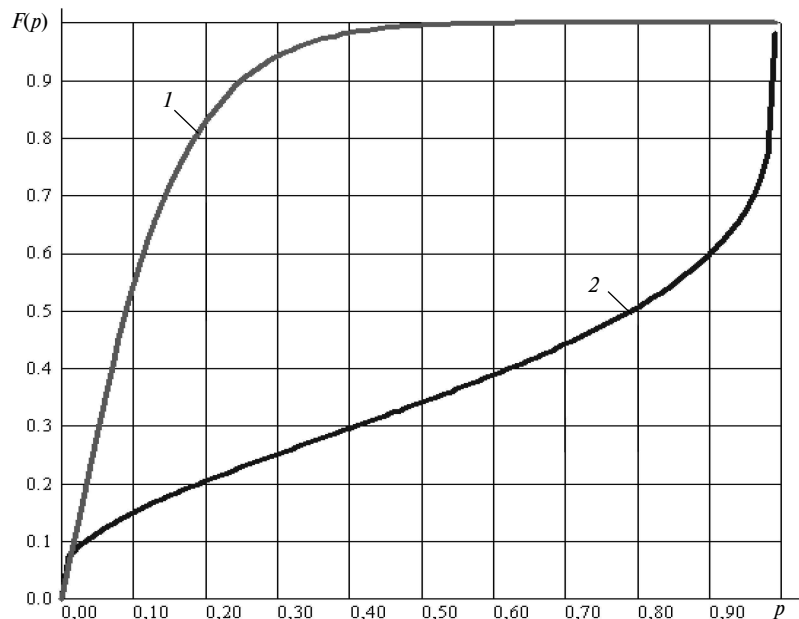
того, какие случайные факторы учитываются, обоснованы различные виды факторных, факторно-временных законов поражения, а также двумерных факторных законов поражения при комбинированном действии двух различных поражающих факторов [3–5]. Они позволяют оценивать пространственные и временные показатели опасности техногенных аварий, от простейших до наиболее полных и интегральных, на уровне их условных и безусловных математических ожиданий.

Различные виды этих законов поражения и их смысл представлены в таблице. Конкретные аналитические представления законов и их параметры наиболее полно изложены в [4].

Помимо этого, используя теорию функций двух случайных аргументов, был впервые получен закон распределения случайной вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести в точке, который имеет следующий вид [1, 4]:

$$F(p) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\sqrt{k_p} \left(\operatorname{arccrf}(2p-1) - \operatorname{arccrf}(2p_e-1) \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где $\sqrt{k_p}$, p_e — параметры закона распределения.



Принципиальный вид функции $F(p)$:
 $1 - p_e = 0,1; \sqrt{k_p} = 2; 2 - p_e = 2; \sqrt{k_p} = 0,5$

График функции распределения случайной вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести показан на рисунке.

Закон (6) позволяет получать гарантированные оценки вероятности поражения в различных точках относительно аварийного объекта.

Различные аспекты рассматриваемых в статье вопросов нашли отражение в лекциях, которые на протяжении ряда лет читались авторами

в различных вузах страны (Военная академия химической защиты, Военная академия связи, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбГПУ).

В результате проведенных теоретических исследований к настоящему времени сложились предпосылки для разработки принципиально новых методов и методик оценки опасности техногенных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефимов, В.Ф.** Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий [Текст] / В.Ф. Ефимов, А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Сб. докладов и выступлений на VIII научно-практ. конф. 8–10 октября 2008 г. — СПб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009. — С. 199–210.

2. **Ефимов, В.Ф.** К вопросу о показателях опасности техногенных аварий [Текст] / В.Ф. Ефимов, А.М. Кармишин, Л.П. Титоренко // Матер. Всероссийской (межведомственной) конференции (24 декабря 2003 года). — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. — С. 76–88.

3. **Адамова, Е.О.** Временные характеристики по-

ражающего действия аварий на объектах хранения и уничтожения химического оружия [Текст] / Е.О. Адамова, А.М. Кармишин, В.А. Киреев / ВАРХБ защиты // НТС. — 2006, № 1 (45). 14–18 с.

4. **Кармишин, А.М.** Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии [Текст]: Монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.М. Кармишин, В.А. Киреев [и др.]. — М.: ООО «АПР», 2011. — 330 с.

5. **Кармишин, А.М.** Теоретическое описание комбинированного действия АХОВ [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин, В.Ф. Ефимов // Матер. V научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». 16–16 декабря 2005 г. — М.: ООО «Рекламно-издательская фирма МТП-инвест», 2006. — С. 379–392.

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета
195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Россия
(499) 263-63-91

КИРЕЕВ Владимир Анатольевич — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Россия
(499) 263-63-91